

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

### **Testování tribologických vlastností mikrofosfátovaných materiálů při vyšších kontaktních tlacích**

### **Testing the Tribological Properties of Microphosphated Materials under Higher Contact Pressures**

Jan Fendrich

**KSP – TP – 831**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

#### Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 102

Počet tabulek: 32

Počet příloh: 13

Počet obrázků: 234

Počet grafů: 22

Datum: 28.5.2010





## ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojírenství

Diplomant: Jan Fendrich

Téma práce: **Testování tribologických vlastností mikrofosfátovaných materiálů při vyšších kontaktních tlacích**

**Testing the Tribological Properties of Microphosphated Materials under Higher Contact Pressures**

Číslo DP: KSP – TP - 831

Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

### Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá testováním mikrofosfátovaných plechů. Mikrofosfátované plechy představují nové typy materiálů používaných v automobilovém průmyslu. Hodnoceny byly tribologické vlastnosti mikrofosfátovaných plechů při vyšších kontaktních tlacích. Testované materiály byly dodány různými výrobci. Kritériem pro hodnocení kvality plechu byl koeficient tření a stav povrchu plechu po tribologickém testu.

### Abstract:

The diploma thesis deals with testing of microphosphated sheets. Microphosphated sheets represent new type of materials used in automotive industry. Evaluated were tribological properties of these microphosphated sheets under higher contact pressures. Tested materials were delivered by different sheets producers. As criterion for quality evaluation was chosen friction coefficient and sheet surface state after tribological testing.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 28. května 2010

.....  
Jan Fendrich  
Nová Pasířská 4016/7  
466 01, Jablonec nad Nisou

## **OBSAH**

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	7
<b>1. Úvod</b>	9
<b>2. Teoretická část</b>	10
2.1. Tribologie	10
2.1.1. Procesy kontaktní	11
2.1.2. Procesy tření	13
2.2. Geometrie povrchu stykajících se těles	14
2.3. Režimy tření a mazání	17
2.3.1. Suché tření	18
2.3.2. Mezné tření	19
2.3.3. Kapalinové tření	20
2.3.4. Smíšené tření	21
2.4. Technologie tažení	21
2.4.1. Napjatosti a deformace v procesu tažení	22
2.4.2. Technologie hlubokého tažení	23
2.5. Tribologické zkoušky	24
2.5.1. Zkouška tření mezi přidržovačem a tažnicí	25
2.5.2. Zkouška tření na tažné hraně	25
2.5.3. Zkouška vypínání přes tažnou hranu	26
2.5.4. Zkouška tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou	26
2.5.5. Jiné tribologické zkoušky	27
2.6. Plechy s povlaky používané v automobilovém průmyslu	27
2.6.1. Povolky na bázi zinku	28
2.6.2. Funkce fosfátové vrstvy v technologii tažení	29
2.7. Povrchy plechů používané v automobilovém průmyslu	30
2.7.1. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou SBT	31
2.7.2. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou EDT	31
2.7.3. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou LT	32
2.7.4. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou EBT	32
2.7.5. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou PRETEX	33

<b>3. Experimentální část</b>	34
3.1. Experimentální část obecně	34
3.2. Testované materiály	35
3.3. Charakteristika použitých čelistí	36
3.4. Vstupní podmínky	37
3.5. Vlastní tribologická zkouška na zařízení SOKOL 400	38
3.5.1. Postup měření na zařízení SOKOL 400	40
3.5.2. Princip zkoušky a hodnocení tribologického testu	40
3.6. Snímkování povrchů testovaných vzorků	42
3.6.1. Konfokální rastrovací laserový mikroskop LEXT OLS 3000	42
3.6.2. Princip mikroskopu LEXT OLS 3000	43
3.6.3. Popis snímkování vzorků	44
3.7. Měření hodnot drsností	44
3.7.1. Měřicí zařízení MarSurf PS1	44
3.7.2. Postup měření parametrů drsnosti	45
<b>4. Výsledky experimentální části</b>	46
4.1. Výsledné tabulkové a grafické hodnoty součinitelů tření pro kalené čelisti	46
4.2. Výsledné tabulkové a grafické hodnoty součinitelů tření pro nekalené čelisti	52
4.2.2. Výsledné hodnoty drsností a jejich grafické porovnání u testovaných substrátů	56
4.3. Snímky jednotlivých substrátů pro kalené čelisti	62
4.4. Snímky jednotlivých substrátů pro nekalené čelisti	77
<b>5. Rozbor získaných výsledků</b>	95
5.1. Konkrétní hodnocení testovaných vzorků	
5.2. Hodnocení z hlediska použitých čelistí	97
5.2.1. Hodnocení z hlediska použití kalených čelistí	97
5.2.1. Hodnocení z hlediska použití nekalených čelistí	97
5.3. Hodnocení dle jednotlivých tlaků a drsností	97
<b>6. Závěr</b>	99
Seznam použité literatury	101
Seznam příloh	102

### Seznam použitých zkratk a symbolů:

$S_r$	[mm <sup>2</sup> ]	obsah skutečné plochy styku těles
$P_{\max}$	[Pa]	maximální Hertzův tlak
$a_H$	[mm]	poloměr vzniklého kruhového vtisku
$S_H$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha vtisku ve tvaru kruhu
$r_1, r_2$	[mm]	poloměry koulí
$r$	[m <sup>-1</sup> ]	poloměr zakřivení
$P_m$	[Pa]	střední kontaktní tlak
$\sigma_e$	[Mpa]	mez pružnosti v měkčím třecím prvku
$F_1$	[N]	vztaženo k elastické deformaci
$F_2$	[N]	vztaženo k plastické deformaci
$F_3$	[N]	vztaženo k deformaci způsobené rytím tvrdého hrotu do měkkého povrchu
$F_4$	[N]	vztaženo k trhání mikrosvarů s menší pevností
$F_5$	[N]	vztaženo k vytrhávání základního materiálu, je-li pevnost meziatomových vazeb větší než pevnost meziatomové mřížky
$F_F$	[N]	třecí síla
$\eta$	[Pa·s]	dynamická viskozita
$S$	[m <sup>2</sup> ]	styčná plocha třecích povrchů
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	lineární rychlost pohybu třecích povrchů
$h$	[m]	tloušťka vrstvy maziva
$p$	[Pa]	měrný střední tlak
$F_N$	[N]	přítlačná (normálová) síla
$F_T$	[N]	třecí síla
$F_{TAŽNÁ}$	[N]	tažná síla
$F_P$	[N]	brzdící síla
$\alpha$		bezprostřední místo styku mezného tření
$\tau_m$	[Mpa]	smykové napětí mezného filmu
$h$	[μm]	tloušťka maziva
$P_m$	[Mpa]	střední kontaktní tlak
$R_z$	[μm]	maximální výška měřeného profilu
$R_a$	[μm]	střední aritmetická odchylka drsnosti
$RP_c$	[1/cm]	počet výstupků měřeního profilu
$h_{kr}$	[μm]	tloušťka filmu při krytické rychlosti
$p_1$	[Mpa]	tlak zařízení SOKOL 400

$S_1$	[mm]	plocha pístu zařízení SOKOL 400
$p_2$	[Mpa]	nastavovaný tlak na agregátu SOKOL 400
$S_2$	[mm]	styková plocha čelistí
$F_{\max}$	[N]	maximální velikost síly z celého průběhu zkoušky
$F_{\min}$	[N]	minimální velikost síly v ustálené oblasti
$F_h$	[N]	maximální velikost síly v ustálené oblasti
$F_s$	[N]	střední velikost síly v ustálené oblasti
EHD		elasto-hydrodynamické tření
SBT		(Short Blast Texturing) – mechanické otryskávání povrchu pracovních válců jemnozrnným granulátem
EDT		(Electric Discharge Texturing) – opracování povrchu pracovních válců pomocí elektrojiskrového výboje
LT		(Laser Texturing) – opracování povrchu pracovních válců pomocí laserového paprsku
EBT		(Electron Beam Texturing) - opracování povrchu pracovních válců pomocí elektronového paprsku
PRETEX		opracování povrchu pracovních válců chromováním

## 1. Úvod

V dnešní době automobilového průmyslu je hlavní důraz věnován na ekonomiku. Jde především o konečnou cenu automobilu jako takového, kterou je zákazník ochoten zaplatit. S ohledem na cenu musí automobil zároveň splňovat hlediska bezpečnosti, kvality a vzhledu. Zákazník také čeká od automobilu minimální náklady na budoucí servis a údržbu.

Většina výše zmíněného je, jak už bylo řečeno, otázkou ceny. Je možné použít místo ocelových plechů materiály jako jsou slitiny hliníku, nebo plasty, kde bychom ušetřili i značnou část hmotnosti karoserie, ale tyto materiály jsou mnohonásobně dražší.

Pokud tedy není možné kvůli ceně použít jiné alternativní materiály, zaměří se otázky úspor do oblasti výrobních nákladů a tedy do zkrácení výrobních procesů.

V oblasti kvality a vzhledu budoucí karoserie hraje důležitou roli povrch používaných materiálů. Ten musí zajistit vysokou kvalitu laku a maximální ochranu proti korozi. Z těchto důvodů se na materiály nanášejí různé povrchové úpravy, na které jsou z hlediska technologie výroby kladeny nároky jako schopnost přijímat mazivo a vytvořit tak mazací vrstvu, nesmí dojít k odtržení tohoto filmu maziva a při vytváření lepených spojů musí povrchy vykazovat vysokou adhezi.

Diplomová práce se zabývá testováním mikrofosfátovaných plechů. Mikrofosfátované plechy představují nové typy materiálů používaných v automobilovém průmyslu. Hodnoceny byly tribologické vlastnosti mikrofosfátovaných plechů při vyšších kontaktních tlacích. Testované Materiály byly dodány různými výrobci. Kritériem pro hodnocení kvality plechu byl koeficient tření a stav povrchu plechu po tribologickém testu.

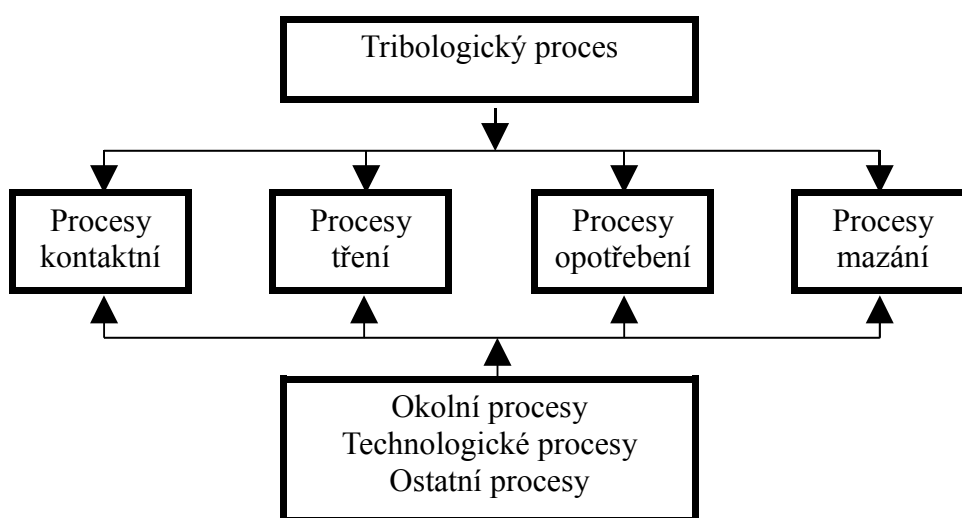
## 2. Teoretická část

### 2.1. Tribologie [1], [2]

Tribologie je nauka o vzájemném působení povrchů při jejich relativním pohybu. Tento pohyb může být kluzný, valivý, rotační, nárazový nebo kmitavý. Vyjmenované pohyby pak mohou probíhat jak samostatně, tak ve společném účinku. V souvislosti s relativním pohybem povrchů dochází vlivem tření ke ztrátě energie, opotřebení povrchů a ztrátě materiálu. Tribologie jako věda se rozděluje do několika specifických oblastí. Mezi tyto oblasti patří:

- *Tribotechnika* – oblast vědy, která se snaží technicky a ekonomicky ovládnout procesy tření a opotřebení a komplexně je aplikovat v praxi.
- *Tribofyzika* – popisuje fyzikální aspekty při vzájemném pohybu dotýkajících se těles.
- *Tribochemie* – popisuje chemické působení stykajících se povrchů s chemicky aktivním médiem.
- *Tribomechanika* – popisuje mechaniku vzájemně se dotýkajících povrchů při tření.
- *Triboorganizace* – zabývá se sběrem, použitím a využitím výsledků z tribotechnické a tribologické vědy.
- *Tribotechnologie* – zabývá se tribologickými problémy z technologického aspektu.
- *Tribobiologie* – popisuje biologická hlediska v tribologickém systému.

Pro zkoumání tribologických vlivů se rozvinuly čtyři základní procesy. Jejich vzájemné vazby jsou na obrázku 2.1.1. Jsou to procesy kontaktní, třecí, mazání a opotřebení.



Obr. 2.1.1: Tribologické procesy a jejich vzájemné vazby [1]



### 2.1.1. Procesy kontaktní [1], [2]

Při kontaktním procesu se pohlíží především na tvarové, rozměrové a materiálové specifikace částí, mezi nimiž dochází k vzájemnému styku ploch. Tato reakce má charakter fyzikální, chemický, materiálový atd. Vzhledem k členitosti druhů kontaktních situací je třeba zvážit:

- počet těles zúčastněných při kontaktním procesu
- makrogeometrii a mikrogeometrii těles
- mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti těles vstupujících kontaktního procesu
- převládající druh deformace
- velikost normálových a tečných napětí
- druh a rychlost vzájemného relativního pohybu

V oblasti kontaktních procesů tuhých těles je třeba si uvědomit k jakému styku mezi povrchy může dojít při nulovém zatížení. Rozeznáváme dotyk v bodě nebo přímce (dotyk koule-koule nebo válec-válec). Tyto úlohy řeší oblast kontaktní mechaniky, především teorie pružnosti.

V kontaktu dvou povrchů má velký význam plocha styku, jež zprostředkuje přenos pohybu. Rozeznáváme obsah plochy geometrické a skutečné, přičemž skutečná plocha styku  $S_r$  je menší než geometrická a jen výjimečně stejná.

V optimálním případě dvou dokonale hladkých pružných těles se uplatňují Hertzovy vztahy a dochází k elastické deformaci.

1. Pro vnik koule o poloměru  $r$  do roviny (obr. 2.1.1.1) platí maximální Hertzův tlak

$$P_{max} = 1,5 \cdot \frac{F_N}{\pi \cdot a_H^2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{a_H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

kde  $F_N$  je normálová síla a  $a_H$  je poloměr vzniklého kruhového vtisku. Pro tento vtisk platí

$$a_H = \left( \frac{3r}{2E'} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot F_N^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

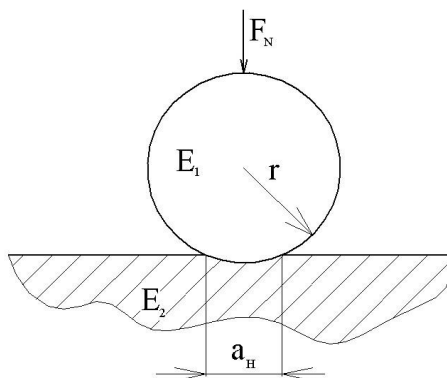
a plocha vtisku  $S_H$  ve tvaru kruhu je

$$S_H = \pi \cdot a_H^2 = \pi \cdot \left( \frac{3r}{2E'} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot F_N^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

kde  $r$  je poloměr vnikající koule a  $E'$  spojený modul pružnosti vyjádřen jako

$$E' = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{1-\nu^2}{E_1} + \frac{1-\nu^2}{E_2} \right], \quad (4)$$

kde  $E_1$ ,  $E_2$  jsou Youngovy moduly pružnosti a  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  jsou Poissonovy konstanty jednotlivých materiálů [3].



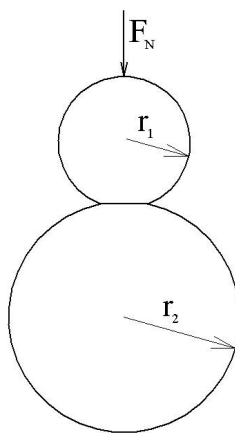
Obr. 2.1.1.1.: Vnik koule poloměru  $r$  do roviny

2. Pro kontakt dvou koulí o poloměrech  $r_1$  a  $r_2$  (viz. Obr. 2.1.1.2) platí stejné závislosti, přičemž poloměr zakřivení  $r$  je dán vztahem

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} . \quad (5)$$

Pro přiblížení těchto koulí platí  $r_1 + r_2 - z$ , kde

$$z = \left( \frac{a}{4 E' r} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot F_N^{\frac{2}{3}} . \quad (6)$$



Obr. 2.1.1.2: Kontakt dvou koulí

3. Ekvivalentní vztahy platí pro aplikace válec na válec nebo válec na rovinu.

V případech Hertzových tlaků je plocha styku úměrná  $F_N^{\frac{2}{3}}$ . Reálné povrchy těles jsou drsné a jejich vzájemný kontakt se děje po výčnělcích. Z toho vyplývá, že skutečná plocha styku je velmi malá a místní tlaky na vrcholcích nerovností jsou dostatečně velké, aby způsobily

elastické až plastické deformace i při velmi malých zatížení.

Pro stanovení skutečné plochy styku je významný Archardův vztah

$$S_r = k \cdot \left[ \frac{F_N}{E} \right]^c, \quad (7)$$

kde je  $0,98 \geq c \geq 0,87$ . Vyjadřuje téměř lineární vztah mezi zatížením a skutečnou plochou.

Rozšířením Hertzových závislostí na pružné kontakty mezi koulemi s drsnými povrchy se zavedli parametry:

- $\sigma^*$  - směrodatná odchylka drsnosti povrchů
- $r^*$  - střední poloměr zakřivení vrcholů drsnosti (je předpokládán totožný pro všechny nerovnosti)

A došlo se k poznání, že:

- celkový počet mikrokontaktů je téměř úměrný zatížení  $F_N$
- průměrná velikost mikrokontaktů je téměř nezávislá na  $F_N$
- skutečná plocha  $S_r$  je úměrná počtu mikrokontaktů

Vztah pro plastickou deformaci výčnělků je

$$P_m = 1,1 \cdot \sigma_e, \quad (8)$$

přičemž  $P_m$  je střední kontaktní tlak a  $\sigma_e$  mez pružnosti v měkčím třecím prvku. Abychom mohli počítat s plastickou deformací na celé stykové ploše, musí platit

$$P_m \geq 3\sigma_e. \quad (9)$$

Se vzrůstající plastickou deformací se zvyšuje plocha styku. To platí i pro děj, při kterém dojde k tání na povrchu jednoho z třecích prvků. Tím se skutečná plocha styku zvětšuje a vyrovnává se geometrické ploše styku.

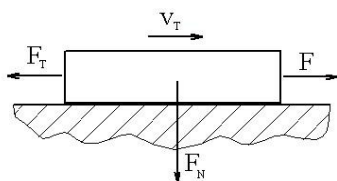
### 2.1.2. Procesy tření

Tření je definováno jako ztráta mechanické energie při vzájemném pohybu navzájem se dotýkajících těles. V obou níže zmíněných případech se snažíme maximálně snížit účinek opotřebení. Z funkčního hlediska můžeme tření definovat takto:

- Tření jako jev potřebný, který z technického hlediska plní předem žádanou funkci. Například tření jako žádoucí jev v brzdách, spojkách nebo převodech.
- Tření jako jev nežádoucí. V tomto případě nám tření snižuje účinnost a pohyb navzájem se dotýkajících těles. Tyto děje vznikají např. v kluzných a valivých ložiskách či ozubených kolech.

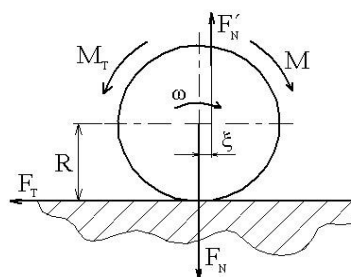
Podle různých účinků dělíme tření na:

- síly, které se mezi dotýkajícími se tělesy projevují při translačním pohybu (obr. 2.1.2.1)
- momenty, které se vyskytují v oblasti stykajících se těles při rotačním pohybu (obr. 2.1.2.2)
- procesy, při kterých se energie tření přemění na jiný druh energie
- Stick-slip efekt



Obr. 2.2.1: Tření formou třecí síly

$$F_T = \mu \cdot F_N$$



Obr. 2.2.2: Tření formou třecího momentu

$$M_T = F \cdot R, \quad M_T = F'_N \cdot \xi$$

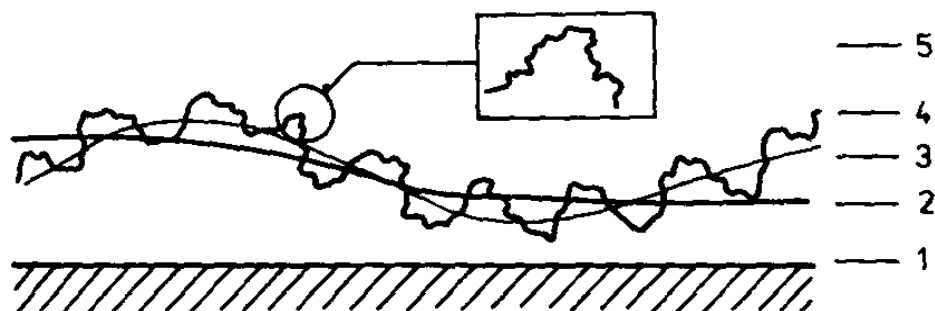
### 2.1.2.1. Stick-Slip efekt

Z hlediska tváření nás nejvíce bude zajímat tzv Stick-Slip efekt. Je to speciální forma tření, která často vyplývá z pomalého posuvného pohybu při tření mezi tělesy. Projevuje se vysokým počátečním třením a následnými trhavými pohyby. Tento proces je ovlivněn závislostí součinitele tření na rychlosti.

## 2.2. Geometrie povrchu stykajících se těles [1], [6]

Povrch tělesa je vnější ohraničení a zároveň oddělení tělesa od okolního prostředí a vymezuje také namáhané povrchové a podpovrchové vrstvy od základního nenamáhaného materiálu. Geometrie povrchu dotýkajících se těles má přímý vliv na proces tření a z toho plynoucí proces opotřebení. Tyto povrchy mají určité geometrické, fyzikální, chemické a jiné vlastnosti, které vyjadřují kvalitu daného povrchu.

V současnosti, jak je znázorněno na obrázku 2.2.1, mají vyrobené povrchy odchylky tvaru, polohy a drsnosti. Odchylky tvaru a polohy od jmenovitého rozměru charakterizují geometrickou kvalitu povrchu. Drsnost povrchu závisí na způsobu výroby, použitém nástroji, tuhosti stroje a soustavy obecně, technologických podmínkách a mnoha dalších faktorech.



Obr. 2.2.1: Znázornění geometrie povrchu [1]

1 – ideálně rovný povrch, 2 – odchylky tvaru a polohy, 3 – vlnitost povrchu,  
4 – mikroskopické drsnosti, 5 – submikroskopické nerovnosti

Základním způsobem hodnocení kvality povrchu je měření drsnosti. Hodnota naměřené drsnosti je pak charakterizována určitou normou daných veličin. Pro hodnocení povrchu se ustálily některé základní parametry, kterými jsou:

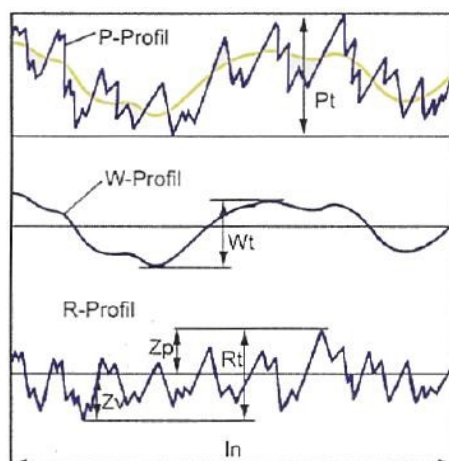
1. Profil povrchu
2. Základní čára
3. Maximální výška měřeného profilu  $R_z$
4. Střední aritmetická hodnota měřeného profilu  $R_a$
5. Počet výstupků měřeného profilu  $R_{Pc}$

#### 1. Profil povrchu

Pomocí drsnoměru získáme 2D profil jako obraz měřeného povrchu. Z primárního profilu (P – profil) se získá profil drsnosti (R – profil) a profil vlnitosti (W – profil). Veličiny P, R a W jsou označeny a znázorněny na obrázku 2.2.2. Tyto veličiny jsou odvozeny od vztažné čáry nazývané střední čára. Střední čára je uvnitř základních délek  $l_p$ ,  $l_r$ ,  $l_w$ , které náleží zmíněným profilům.

Na tomto povrchu se poté hodnotí veličiny jako:

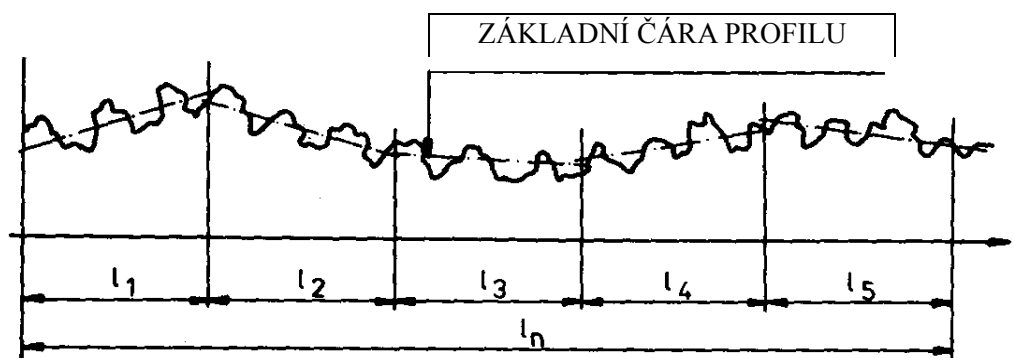
- Hloubka profilu  $P_t$ , která charakterizuje délku dvou sousedních rovnoběžných přímek tečných k nejvyššímu a nejhlubšímu vrcholu.
- Hloubka vln  $W_t$  charakterizující vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu vlnitosti na délce  $l_n$ .
- Nejvyšší hloubka drsnosti  $R_t$  jako vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším vrcholem drsnosti povrchu na úseku měřené délky  $l_n$ .



Obr. 2.2.2: Dvoudimenzionální profil povrchu získaný drsnoměrem

## 2. Základní čára profilu

Na obrázku 2.2.3 je zobrazena tzv. základní čára profilu, která rozděluje nerovnosti charakterizující drsnost povrchu. Vyhodnocuje se jedna nebo více délek základní čáry.

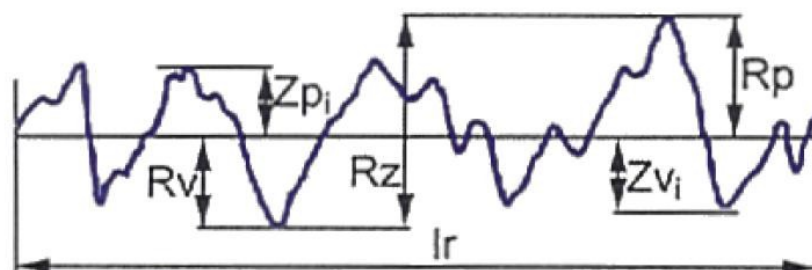


Obr. 2.2.3: Základní čára profilu

## 3. Maximální výška měřeného profilu $R_z$

Maximální výška nerovností  $R_z$  určuje v rozsahu základní délky výšku mezi čarou výčnělků a čarou prohlubní (obr. 2.2.4). Maximální výška nerovností je

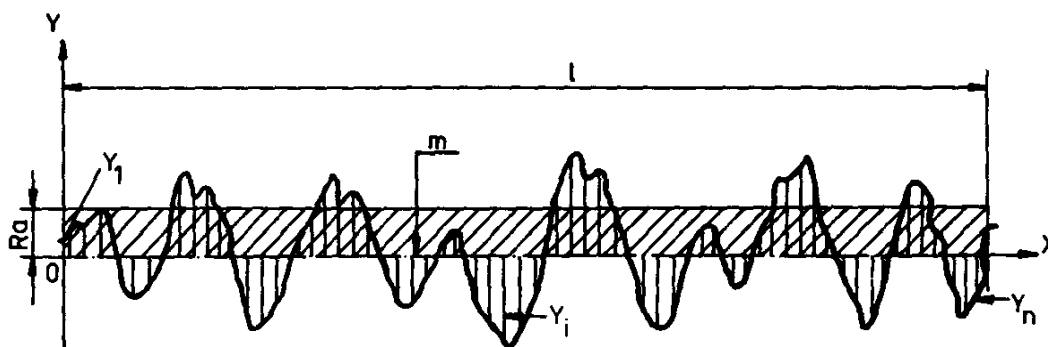
$$R_z = R_v + R_p \quad (10)$$



Obr. 2.2.4: Maximální výška nerovností  $R_z$

#### 4. Střední aritmetická hodnota měřeného profilu $R_a$

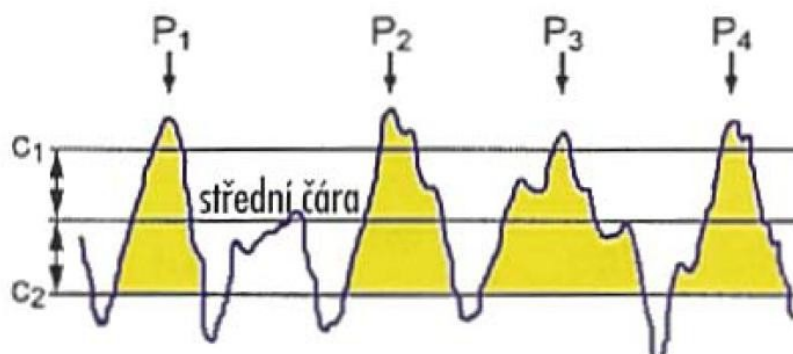
Střední aritmetickou odchylkou  $R_a$  je definována střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v délce základní čáry (obr. 2.2.5).



Obr. 2.2.5: Střední aritmetická odchylka  $R_a$

#### 4. Počet výstupků měřeného profilu $RP_c$

Jak je znázorněno na obrázku 2.2.6, počet výstupků  $RP_c$  je počet výstupků  $P$  vztahených na 10mm délky. Je důležité zadat hladiny řezu  $C_1$  a  $C_2$ .



Obr. 2.2.5: Počet výstupků měřeného profilu  $RP_c$

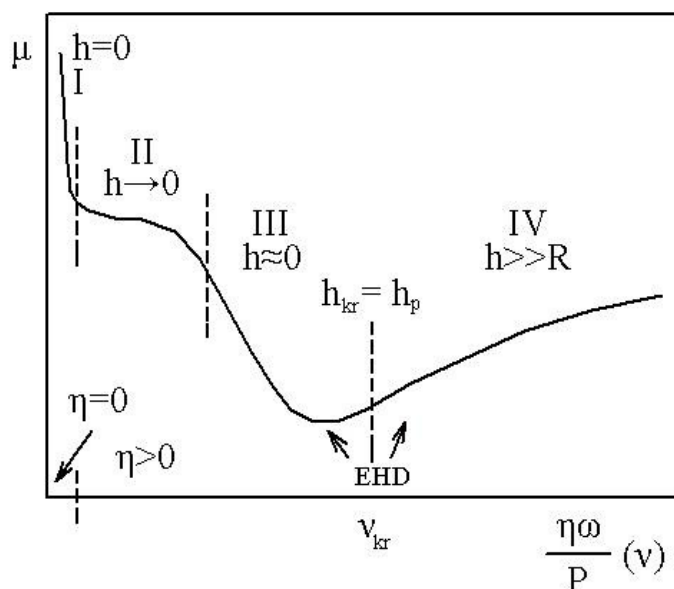
### 2.3. Režimy tření a mazání [2]

Mezi třecími povrchy rozlišujeme z hlediska prostoru tření suché a tekutinové. Při suchém tření dochází k bezprostřednímu kontaktu mezi povrchy. U tekutinového tření dochází k dokonalému oddělení povrchů viskózní tekutinou (kapalinou nebo plynem). Jednotlivé režimy můžeme rozlišovat podle kritéria viskozity (viz obr 2.3.1)

$$\frac{\eta\omega}{P}, \quad (11)$$

kde  $\eta$  je viskozita,  $\omega$  rychlost smyku vyjádřená jako frekvence a  $P$  je tlak působící na jednotku geometrického povrchu. Se zvyšující se hodnotou bezrozměrného kritéria viskozity se z oblasti suchého tření přechází do oblasti tření mezného, kdy se tloušťka tekutinového

filmu blíží nule. Z režimu tření mezného přecházíme do oblasti smíšeného tření, při kterém má film tekutiny tloušťku shodnou s profilem drsnosti a nakonec do oblasti tekutinového tření, kdy je film tekutiny tlustší než nejvyšší vrcholky drsného profilu. Ve všech oblastech tření závisí součinitel tření  $\mu$  na zatížení, kvalitě a velikosti povrchu, rychlosti smyku, mazivu a prostředí.



Obr. 2.3.1: Upravený Stribeckův diagram [2]

I – oblast suchého tření, II – oblast mezného tření, III oblast smíšeného tření a částečně EHD-režimu, IV – oblast hydrodynamického a elastohydrodynamického tření,  $h$ - tloušťka mazací vrstvy,  $R$  – drsnost povrchu,  $h_{kr}$  – tloušťka filmu při kritické rychlosti,  $v_{kr}$  – přechod ze smíšeného do kapalinového tření

### 2.3.1. Suché tření

V současných představách má suché tření dva aspekty: deformační a adhezní. V prvním případě se více uplatňuje mechanika a ve druhém je to chemie. Na oba aspekty mají vliv vlastnosti povrchů: jejich velikost, topografie, tepelné vlastnosti, mechanické vlastnosti, chemické složení včetně přítomných nečistot, adsorbovaných, reakčních a nanesených tuhých vrstev a chemická reaktivita. Dva aspekty suchého tření vystihuje například Kragelského vztah pro třecí sílu.

$$F_F = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4 + \Sigma F_5 \quad (12)$$

kde je:

$F_1$  ... vztaženo k elastické deformaci [N]

$F_2$  ... vztaženo k plastické deformaci [N]

$F_3$  ... vztaženo k deformaci způsobené rytím tvrdého hrotu do měkkého povrchu [N]



$F_4$  ... vztaženo k trhání mikrosvarů s menší pevností [N]

$F_5$  ... vztaženo k vytrhávání základního materiálu, je-li pevnost meziatomových vazeb větší než pevnost meziatomové mřížky [N]

$\Sigma$  ... vztaženo ke všem nerovnostem povrchu

### 2.3.2 Mezné tření

O mezném tření mluvíme v okamžiku, existuje-li mezi třecími povrchy tenká vrstva adsorbovaných molekul plynu, kapaliny nebo látky vytvořené chemickou reakcí povrchů.

K meznímu mazání dochází i v případě záměrně mazaných povrchů, kdy není přísun maziva dostatečný nebo vrstva dodávaného maziva není dost únosná. Třecí plochy se poté přiblíží k sobě natolik, že jejich vzájemnému styku brání jen mezní vrstva maziva, tj. film polárních molekul maziva s velkou přilnavostí. V praxi vzniká mezní tření v případě velkých tlaků na malých stykových plochách, při malých smykových rychlostech a mezi drsnými povrchy.

Schématické zobrazení mezního tření je na obrázku 2.3.2.1, ze kterého také můžeme odvodit součinitel tření. Pokud je rozměr  $\alpha$  místem bezprostředního styku s povrchem,  $S_0$  plocha mezního filmu,  $\tau_m$  smykové napětí mezního filmu,  $S_r$  oblast reálného styku povrchů a  $\tau_s$  smykové napětí při styku těchto povrchů, platí pro třecí sílu  $F_F$  vztah

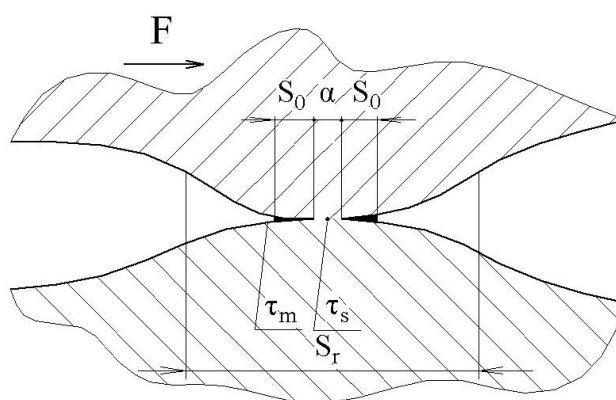
$$F_F = \alpha \cdot S_r \cdot \tau_s + (1 - \alpha) \cdot S_r \cdot \tau_m = S_r \cdot [\alpha \cdot \tau_s + (1 - \alpha) \cdot \tau_m]. \quad (13)$$

Protože

$$F_N = S_r \cdot P_m = S_r \cdot \sigma_e, \quad (14)$$

kde  $P_m$  je tlak působící na skutečnou třecí plochu, platí pro výpočet smykového součinitele tření

$$\mu_{sm} = \frac{F_F}{F_N} = \frac{\alpha \cdot \tau_s + (1 - \alpha) \cdot \tau_m}{P_m} = \frac{\alpha \cdot \tau_s + (1 - \alpha) \cdot \tau_m}{3 \cdot \sigma_e}. \quad (15)$$



Obr. 2.3.2.1: Poměry vznikající při mezním tření

### 2.3.3 Kapalinové tření

Při kapalinovém tření dochází k úplnému oddělení třecích ploch souvislou vrstvou maziva. Tato vrstva vyrovnává nerovnosti povrchu a navíc svým vlastním tlakem ruší účinek kolmého zatížení na povrchy těles.

Třecí síla je v těchto podmínkách závislá pouze na velikosti vnitřního tření v mazací vrstvě. Lze ji popsat vztahem podle Petrova:

$$F_F = \eta \frac{S \cdot v}{h} [N] \quad (16)$$

kde je:

$\eta$  ... dynamická viskozita [Pa·s]

$S$  ... styčná plocha třecích povrchů [m<sup>2</sup>]

$v$  ... lineární rychlost pohybu třecích povrchů [m·s<sup>-1</sup>]

$h$  ... tloušťka vrstvy maziva [m]

Součinitel kapalinového tření  $\mu$  lze vyjádřit vztahem

$$\mu = \frac{\eta \cdot v}{h \cdot P}, \quad (17)$$

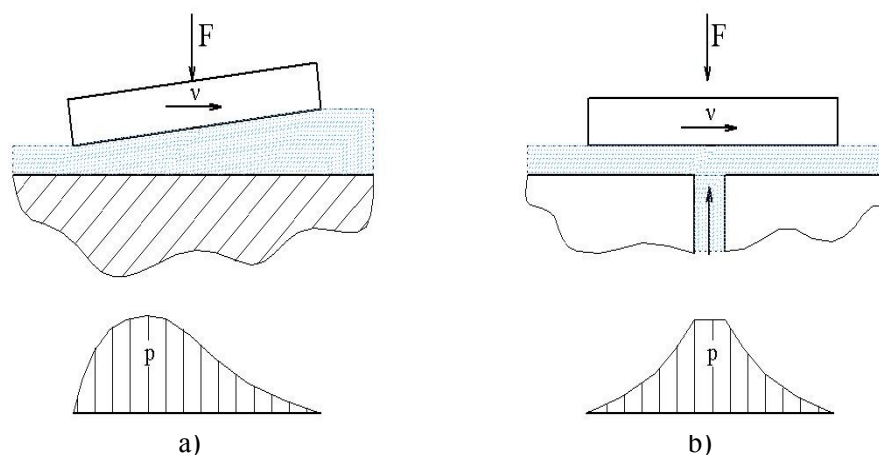
kde  $p$  je měrný střední tlak  $\frac{F_N}{S_N}$  [Pa] a  $S_N$  je průmět kluzné plochy.

Má-li být mazací vrstva schopna přenášet tečná zatížení, kterým jsou tělesa přitlačována k sobě, musí v ní být vytvořený dostatečný protitlak. Toho se docílí dvěma způsoby – hydrostaticky a hydrodynamicky.

V kapalném mazivu vznikne hydrodynamický tlak, je-li unášeno do zúženého prostoru a je-li povrch jednoho tělesa nakloněn oproti druhému v určitém úhlu ve směru pohybu. Vznikne tak klínová část maziva, ve které se v důsledku rozdílů rychlostí vytvoří tlak působící na klouzající povrchy. Velikost tlaku závisí na smykové rychlosti, viskozitě maziva a na úhlu naklonění povrchu.

Nesplňuje-li proces podmínky pro vytvoření dostatečného hydrodynamického tlaku v mazivu, tj. při malých rychlostech smyku a velkých tlacích, je potřeba vytvořit tlak hydrostatický. Ten se vytvoří zavedením kapalného maziva mezi smykové plochy pod tlakem, který odpovídá kolmému zatížení smykových ploch.

Principy tvorby hydrodynamického a hydrostatického tlaku a jejich rozložení v kapalném mazivu jsou znázorněny na obrázcích 2.3.3.1. (a) a 2.3.3.1. (b).



Obr. 2.3.3.1. Hydrodynamický (a) a hydrostatický (b) tlak

#### 2.3.4. Smíšené tření

Smíšené tření je spojením tření kapalinového a tření mezného. Tzn. třecí povrchy nejsou dokonale odděleny vrstvou maziva a dochází i k bezprostřednímu styku jejich nerovností. Ke smíšenému tření tedy dochází, jestliže tloušťka maziva mezi povrchy je menší než tloušťka potřebná k zajištění hydrodynamického mazání, ale zároveň je větší než tloušťka tenkého filmu, který zajišťuje mazání mezní.

Součinitel tření  $\mu$  v procesu smíšeného tření je funkcí tloušťky mazací vrstvy  $h$ , která

je dána vztahem  $h = \frac{\eta v}{P}$ . Na velikost součinitele tření a tloušťky mazací vrstvy má největší vliv rychlost  $v$ .

#### 2.4. Technologie tažení [5]

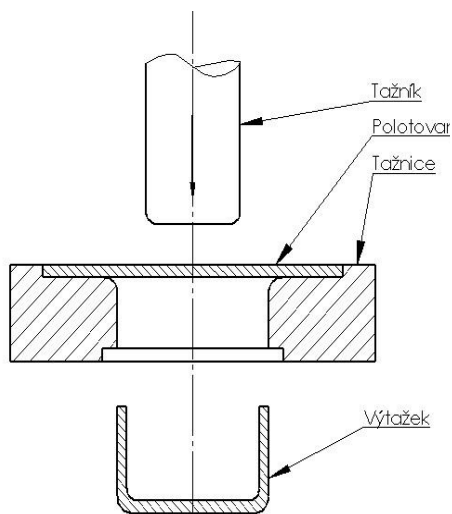
Technologií tažení se přetváří rovinné těleso v prostorové duté těleso, které je na počátku ve formě přístříhu, nebo se jinak přetváří již předem zpracované polotovary. Tyto polotovary lze dále zpracovávat následovně: prostým tažením, tažením se ztenčením stěny, zpětným tažením, žlábkováním, lemováním, rozšiřováním, přetahováním, zúžováním, napínáním.

Nástroj se v případě technologie tažení skládá s tažníku, tažnice a jiných konstrukčních částí.

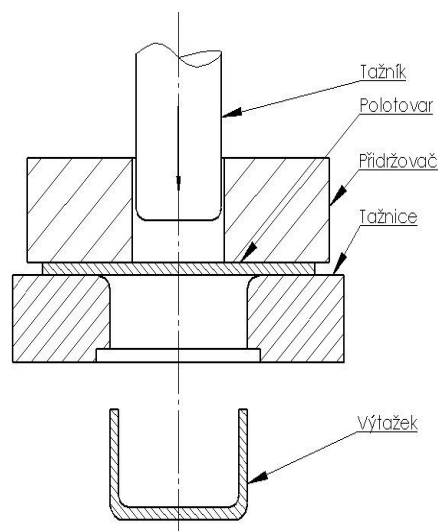
Technologie tažení je znázorněna na obrázku 2.4.1., kde se z jednoduchého přístříhu vytvaruje válec. V tomto případě vtačuje tažník kruhový přístřih do tažnice přes tažné hrany. Podobným způsobem se vyrábí i výtahy nepravidelných tvarů.

Při tažení dochází ke značnému přesunu nežádoucího objemu materiálu a ten pak

způsobuje pohledové vady ve formě vln. Těm můžeme zabránit použitím přidržovače (obr. 2.4.2.).



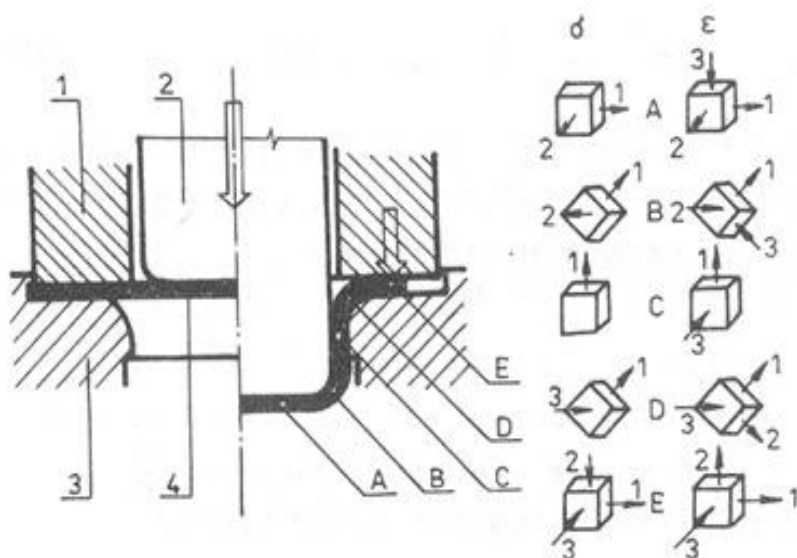
Obr. 2.4.1: Tažení válcového tvaru



Obr. 2.4.2: Tažení válcového tvaru s přidržovačem

#### 2.4.1. Napjatosti a deformace v procesu tažení

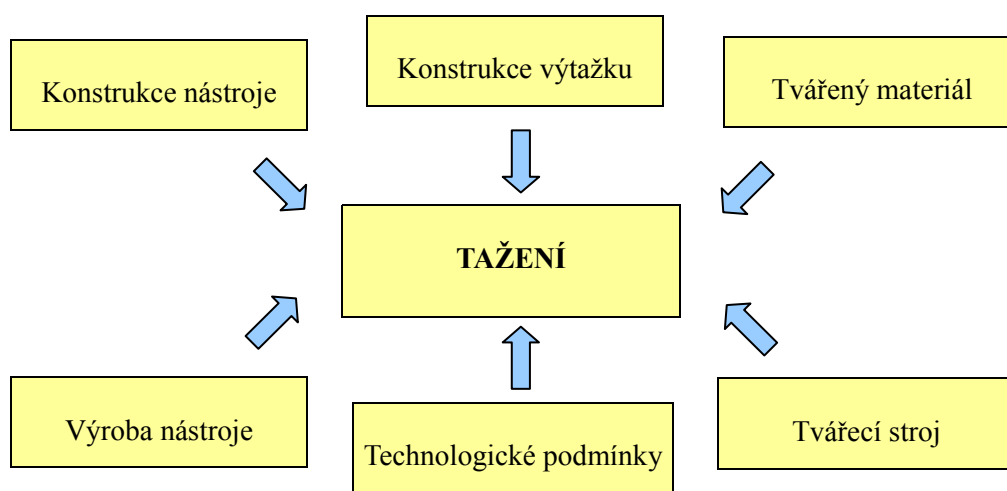
Napjatost je v jednotlivých částech výtažku různá (viz Obr. 2.4.1.1.). Dochází k anizotropii mechanických vlastností tvářeného plechu. Materiál svíraný pod přidržovačem (E) je namáhán v radiálním směru tahem a v tangenciálním směru tlakem. Materiál ohýbaný přes tažnou hranu (D) je namáhán radiálním a tangenciálním tlakem. Válcová část (C) je namáhána tahem v jednom směru a u dna (B) je dvojosá nebo trojosá napjatost. Stejnomořně se vytahuje dno (A) do dvou směrů.



Obr. 2.4.1.1: Stavy napjatosti a deformací při tažení s přidržovačem [5]

#### 2.4.2. Technologie hlubokého tažení [4]

Jak již bylo zmíněno, technologií tažení rozumíme přetvoření rovinného tělesa v prostorové těleso. Vznikají součásti nerovinnutelných tvarů. Technologie tažení je jednou z nejrozšířenějších a nejproduktivnějších metod výroby součástí s mnohými přednostmi. Jde především o kvalitní povrch a přesnost a tuhost výtažků. To vše při minimální váze. Dále u výtažků dochází ke zvýšení meze kluzu a pevnosti v závislosti na stupni přetvoření. Na obrázku 2.4.2.1 jsou znázorněny hlavní faktory ovlivňující kvalitu finálního výrobku.



Obr. 2.4.2.1: Faktory ovlivňující kvalitu výrobku

##### 2.4.2.1. Technologické vlivy ovlivňující proces hlubokého tažení

Přetvoření rovinného tělesa v prostorové se uskutečňuje na definovaném nástroji a lisu při určených technologických podmínkách. Podmínky a vlivy účastníci se procesu tažení na lisu mají významný vliv na konečnou kvalitu výrobku. Z doposud získaných informací jsou hlavními činiteli ovlivňujícími vlastní tažení a přetvoření přidržovací tlak, rychlost tažení a mazání.

###### 2.4.2.1.1. Vliv přidržovacího tlaku na technologii tažení

Vlivem přidržovacího tlaku a tedy jeho nastavením jsme schopni ovlivnit tvorbu vln vznikajících v oblasti příruby. Přidržovací tlak je vyvozen přidržovačem a tento tlak musí být takové hodnoty, aby ke zvlnění nedocházelo. Pokud by byl tlak přidržovače příliš velký, došlo by k výraznému nárůstu třecích sil a to by způsobilo porušení výtažku. U složitějších výtažků karosářského typu vznikají rozdílné tlaky v různých částech výtažku a nastavení přidržovacího tlaku je tak velmi citlivé.

#### **2.4.2.1.2. Vliv rychlosti tažení na technologii tažení**

V současnosti jsou na pracovištích lisoven používány vysokorychlostní lisy s vysokým počtem zdvihů. S nárůstem objemů výroby se tedy zvýšila i rychlost vlastního tažení. Na základě mnoha zkoušek a výsledků bylo zjištěno, že při tažení velkorozměrových výtažků složitých tvarů má nárůst rychlosti tažení negativní vliv na proces plastické deformace. Důsledkem je vznik plastických vln, které způsobují lokální deformace a tím porušení výtažku. Rychlost tedy ovlivňuje třecí poměry.

#### **2.4.2.1.3. Vliv mazání na technologii tažení**

Při tažení vznikají třecí síly a to má za následek vzrůst tažné síly o 20-30%. Tření samotné způsobuje otěr, opotřebení činných částí nástroje a ovlivňuje také mezní hodnoty stupně tažení. Abychom snížili vznikající tření je nezbytné použít vhodný druh maziva.

S procesem mazání souvisí i problematika zadírání. Zadírání je jev běžně se vyskytující v technologii tažení a podstatně ovlivňuje konečnou kvalitu pohledových dílů.

### **2.5. Tribologické zkoušky[3]**

V oblastech mazání, tření a opotřebení existuje mnoho zkušebních metod. Nejvhodnější je zvolit takový typ zkoušky, která se nejvíce přibližuje dané výrobní technologii. Proto je vhodné znát spektrum zatížení, velikost ztrát a tribostrukturu.

Informace zkoumaného tribosystému je velmi obtížné získat. Existují také problémy s přenosem dat ze zkoušek vzorků na finální výrobek. Proto je občas nutné dělat zkoušky nejen v laboratoři, ale i na modelovém zkušebním zařízení či přímo v provozu. Finanční nákladnost zkoušek je přímo úměrná složitosti tribologického systému.

Velikost třecích sil při tváření závisí na:

- Mikrogeometrii povrchu (druh a drsnost povrchové struktury)
- Rychlosti posuvu materiálu po nástroji
- Deformaci materiálu
- Druhu použitého povrchu (typ pokovený, nepokovený, chemické složení)
- Druhu materiálu nástroje a stavu jeho povrchu
- Použitým mazivu
- Velikosti tlaku mezi materiálem a nástrojem
- atd...

Bohužel všechny výše zmiňované veličiny se v tribologickém ději nevyskytují

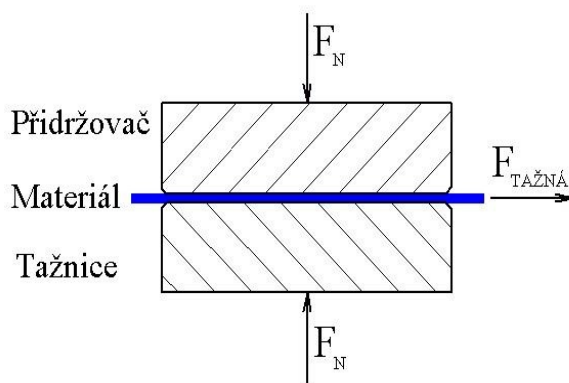
samostatně, ale navzájem se ovlivňují. Je tedy těžké hodnotit jednotlivé vlivy odděleně a proto se hodnocení vztahuje na celou soustavu nástroj-mazadlo-materiál-technologické podmínky.

### 2.5.1. Zkouška tření mezi přidržovačem a tažnicí

Tato modelová zkouška spočívá v protahování pásku testovaného materiálu mezi zkušebními čelistmi. Princip tohoto testu, který vyvinul Wojtowicz je znázorněn na obr. 2.5.1.1.

Hlavní výhodou tohoto testu je snadné nastavení zkušebních podmínek (rychlosti protahování pásku a velikosti přitlačné síly čelistí) a měření třecí síly  $F_T$ . Z hodnot přitlačné síly  $F_N$  a třecí síly  $F_T$  se pa snadno vypočte koeficient tření.

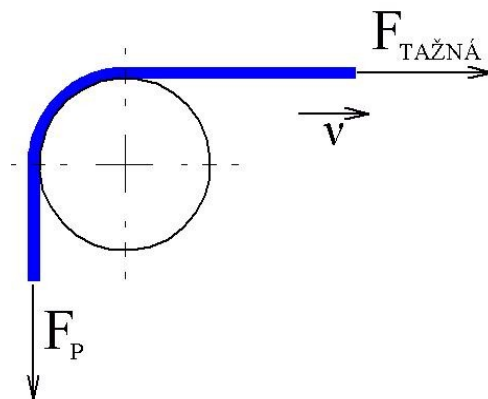
Zřejmou nevýhodou tohoto testu je napjatost zkoušeného materiálu. Ta není stejná jako napjatost způsobená skutečným přidržovačem a nedochází ani k výrazné plastické deformaci, která je při tažení značná.



Obr. 2.5.1.1. Zkouška tření mezi přidržovačem a tažnicí

### 2.5.2. Zkouška tření na tažné hraně

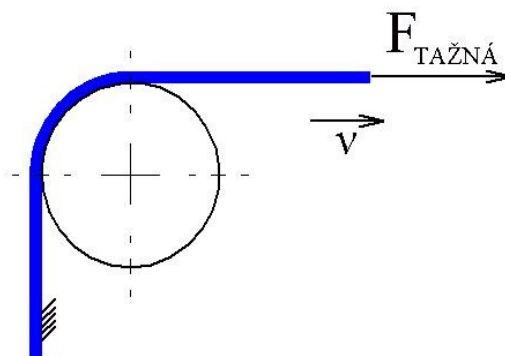
Zkoušený materiál je tažen přes tažnou hranu za konstantní rychlosti  $v$ . Tažná hrana je ve tvaru válečku o určitém poloměru  $R$ . Hodnocením tribologických poměrů vzniklých na tažné hraně je velikost tažné síly  $F_{TAŽNÁ}$ . Velikost tažné síly je ovlivněna protitahem brzdící síly  $F_P$ , koeficientem tření, délkou styku vzorku s tažnou hranou (tzv. úhlu opásání) a mechanickými vlastnostmi zkoušeného vzorku. Charakteristické znázornění je na obr. 2.5.2.1. Výhodou je snadné nastavení rychlosti protahování vzorku. Nevýhodou je pak špatná kontrola kontaktního tlaku mezi vzorkem a tažnou hranou. Pro zjištění koeficientu tření na tažné hraně je nutné zjistit síly, které jsou potřeba pro ohýb a narovnání pásku.



Obr. 2.5.2.1: Zkouška tření na tažné hraně

### 2.5.3. Zkouška vypínání přes tažnou hranu

Tento test spočívá v tažení zkoušeného materiálu přes tažnou hranu tažnice, která je reprezentována válečkem o zvoleném poloměru  $R$ . Děj probíhá za konstantní rychlosti  $v$ . Tažná hrana je ve tvaru válečku o určitém poloměru  $R$ . Při této metodě je vzorek na jednom konci pevně uchycen a druhý konec se pohybuje již zmiňovanou konstantní rychlostí  $v$ . Deformace vzorku je určena předem a vyhodnocuje se tažná síla  $F_{\text{TAŽNÁ}}$  potřebná k jejímu dosažení. Deformace vzniklá v kontaktní zóně je podobná deformaci materiálu při hlubokém tažení na čele tažníku. Nevýhodou testu je obtížné nastavení kontaktního tlaku a kluzné rychlosti na tažné hraně. Schéma zkoušky je zobrazeno na obr. 2.5.3.1.

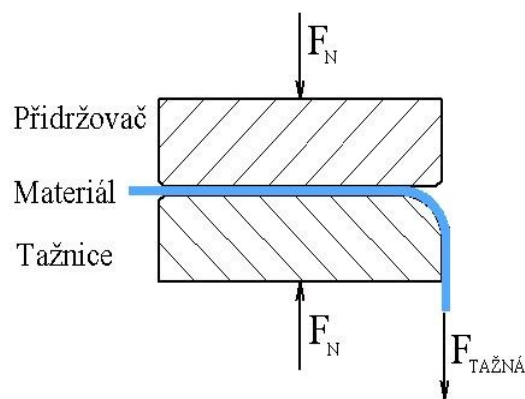


Obr. 2.5.3.1: Zkouška vypínání přes tažnou hranu

### 2.5.4. Zkouška tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou

Metoda tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou na obr. 2.5.4.1 je kombinací dříve zmiňovaných zkoušek v kapitolách 2.5.1 a 2.5.2. Znovu je důležitou hodnotou velikost tažné síly  $F_{\text{TAŽNÁ}}$  potřebná k protažení pásu.

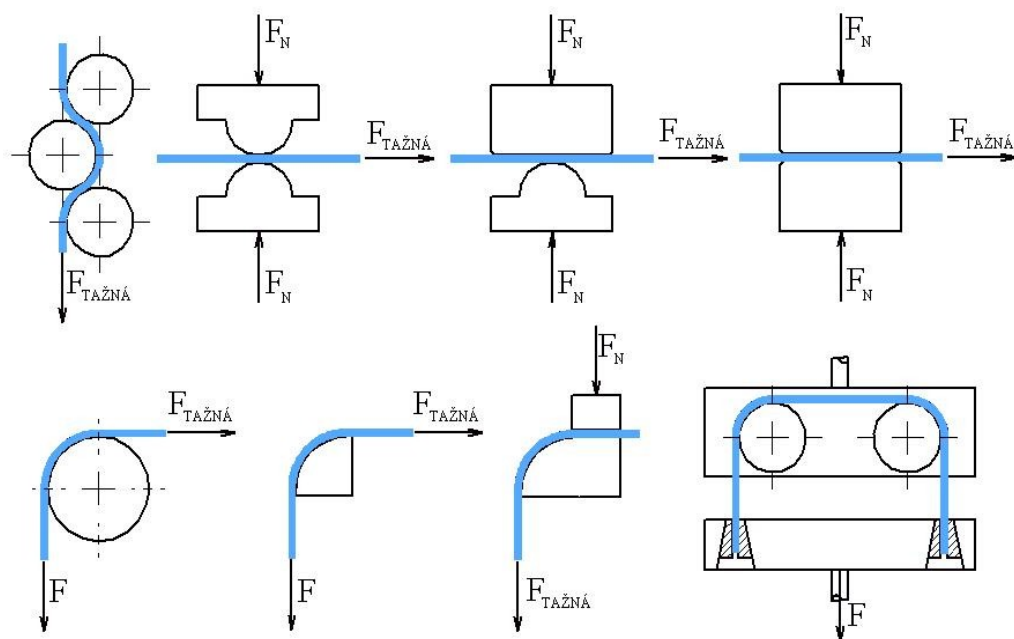




Obr. 2.5.4.1: Zkouška tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranu

### 2.5.5. Jiné tribologické zkoušky

Existuje mnoho laboratorních zkoušek pro hodnocení tribologických vlastností mazadel, povlaků a substrátů (viz obr. 2.5.5.1).



Obr. 2.5.5.1: Jiné způsoby tribologických zkoušek

### 2.6. Plechy s povlaky používané v automobilovém průmyslu [4], [8]

Podstatou povlaků je zítat určité požadované vlastnosti stavu povrchu materiálu potřebných pro dlouhodobou funkci. Plechy v automobilovém průmyslu jsou po celou dobu jejich životnosti vystaveny působení prostředí. Požadujeme tedy neměnnost jejich původních vlastností a zachování vzhledu. Důvodem je fakt, že korozní odolnost materiálu, který nám

vyhovuje z konstrukčního hlediska, není vždy dostatečná.

Dle účelu lze povlaky rozdělit na:

- povlaky proti korozi
- povlaky použité pro dosažení požadovaného vzhledu
- povlaky pro dosažení speciálních vlastností jako elektrická vodivost, ořezuvzdornost nebo tvrdost

V automobilovém průmyslu je nejrozsáhlejší prvně zmíněná skupina, tedy povlaky použité z hlediska protikorozní ochrany. Jsou to hlavně povlaky na bázi zinku, které poskytují podkladovému kovu protikorozní ochranu.

Hlavním hlediskem v oblasti hodnocení ochranné funkce povlaků je vliv tloušťky a poréznosti daného povlaku. Se zvyšující se tloušťkou povlaku roste jeho životnost, protože se snižuje počet korozně významných pórů. Optimální je tedy situace, kdy je povrch zcela neporézní. Poréznost je tedy vysvětlením mechanismu ochranné účinnosti povlaků.

#### **2.6.1. Povlaky na bázi zinku**

Povlaky na bázi zinku jsou bílé s namodralým odstínem. Zinek je elektrochemicky neušlechtilý kov a ve spojení se základním materiálem karoserie se stává obětovanou anodou. Rozpouští se dříve než základní kov a tím ho tak chrání do doby, než dojde k jeho proděravění.

V praxi jsou nejčastěji používané tři hlavní metody tvorby ochranných povlaků:

- metoda žárového pokovení
- metoda elektrolytického nanášení povlaku
- nanesení organických povlaků s obsahem zinku

##### **2.6.1.1. Technologie žárového pokovení zinkem**

Princip žárového pokovení spočívá v tom, že se předměty ponořují do roztaveného kovu, v tomto případě zinku o teplotě kolem 450°C. Povlak se vytvoří dojde-li k reakci mezi základním a povlakovým kovem. Tloušťka povlaku zinku je nejčastěji od 7 do 200 μm. Tímto způsobem se pokovují nejčastěji výrobky kusové výroby a plechy v tabulích a ve svitcích. Z této technologie je patrné že velikost pozinkovaného výrobku je omezena velikostí smáčecí vany. Nevýhodou této metody je, že může dojít k ovlivnění mechanických vlastností materiálu, zejména hlubokotažnosti.

Základní postupy nanášení zinkového povlaku:

1. *Mokrý způsob* – tento způsob je založen na ponořování výrobku do lázně, která je v první polovině pokryta tekutým tavidlem a předměty přes tuto vrstvu vstupují do zinku. Poté jsou vyjmuty přes čistou hladinu ven.
2. *Suchý způsob* – díly se předem ponoří do roztoku tavidla, poté se vyjmou, usuší a následně ponoří do pozinkovací lázně.
3. *Speciální postupy* – se používají při kontinuálním procesu zinkování. Jde například o zinkování ocelových pásů způsobem Sendzimira – oxidačním ohřevem je pás zbaven mastných nečistot a po redukování vodíkovou atmosférou vstoupí do zinkové lázně. V té se pokoví.

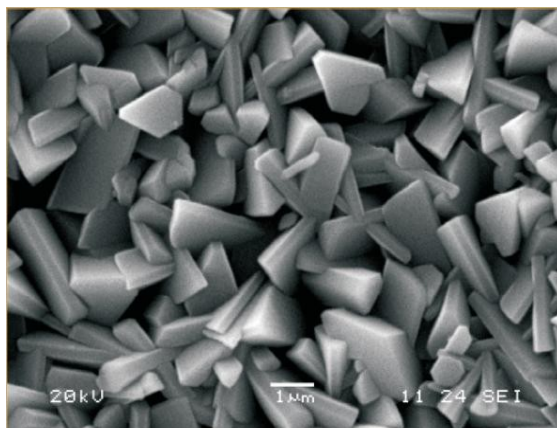
#### 2.6.1.2. Technologie elektrolytického pokovování zinkem

Při této metodě nedochází ke změnám mechanických vlastností. Tloušťka vrstvy je běžně mezi 7 až 10  $\mu\text{m}$ . Zatímco u žárového pokovení namáčíme celý díl a povlak se tak vytvoří po celé ploše, u elektrolytického pokovení se nabízí možnost pokovit pouze jednu stranu plechu.

Samotný zinkový povlak se tvoří v pozinkovací komoře, kde mohou být elektrody uspořádány buď jednostranně nebo oboustranně. To dle rozdělení konstrukce uspořádání elektrod.

#### 2.6.2. Funkce fosfátové vrstvy v technologii tažení [8]

Fosfátování je chemický proces při kterém se na povrchu materiálu vytvářejí povlaky – vrstvy fosforečnanu zinečnatého, manganatého, vápenato-zinečnatého nebo železnatého. Pro vznik fosfátové vrstvy je nezbytně nutná reakce povrchu materiálu s fosfatizačním roztokem. Fosfatizační povlaky jsou elektricky nevodivé. Proto snižují velikost korozního proudu. Detail fosfátové vrstvy je na obrázku 2.6.2.1.



Obr 2.6.2.1: Detail fosfátové vrstvy [9]

Na povrchu materiálu vznikají krystalické fosfátové vrstvy, které mohou plnit tyto funkce:

- tvoří antikorozi ochranu součástí
- při tváření za studena snižovat tření a zvyšovat přilnavost maziva
- zlepšovat přilnavost nátěrových hmot
- fungovat jako elektrické izolátory

Pro technologii tažení je důležité, že jako mezivrstva zabraňuje fosfát přímému kontaktu mezi nástrojem a tvářeným materiálem a navíc je nosnou vrstvou pro mazivo. Z tohoto důvodu se většina výrobků fosfátuje před samotným tvářením. Pokud opatříme fosfátovou vrstvu dostatečně reaktivním mazivem, přemění se část fosfátu na tzv. zinkové mýdlo, které zaručuje mimořádnou chemickou i mechanickou stabilitu filmu. Pro technologii tažení jsou vhodné středně tlusté fosfátové vrstvy o hmotnosti 10 až 20g·m<sup>-2</sup>.

## **2.7. Povrchy plechů používané v automobilovém průmyslu [6]**

V dnešní době jsou hlavními parametry zákazníků kupujících automobily spolehlivost, bezporuchovost a životnost karoserie. Životnost karoserie je ovlivněna především protikorozi odolností používaných materiálů. Ty však ve svém surovém stavu podléhají korozi velmi snadno a tak našla uplatnění technologie povrchových úprav.

Požadavky na plechy zpracovávané v automobilovém průmyslu jsou čím dál náročnější a to vše se snahou udržet cenu konečného výrobku na co nejnížší hodnotě.

Hlavním měřítkem je tedy zákazník a je známo že vzhled automobilu, tedy laku a povrchu vůbec je jedním z prvních dojmů, po kterém si zákazník udělá obrázek o kupovaném automobilu.

Všichni světový výrobci se dnes zabývají problematikou výroby morfologie povrchu plechů. Pojďme tedy zmínit některé aktuální technologie, kterými jsou:

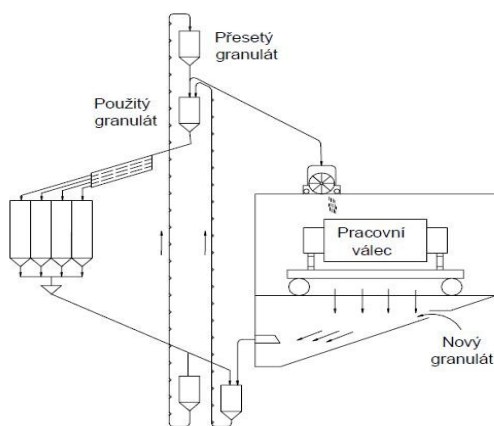
- SBT (Short Blast Texturing) – mechanické otryskávání povrchu pracovních válců jemnozrnným granulátem
- EDT (Electric Discharge Texturing) – opracování pomocí elektrojiskrového výboje
- LT (Laser Texturing) – opracování povrchu pracovního válce pomocí laserového paprsku
- EBT (Electron Beam Texturing) - opracování povrchu pracovního válce pomocí elektronového paprsku
- PRETEX – opracování pomocí chromování pracovního válce

### 2.7.1. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou SBT

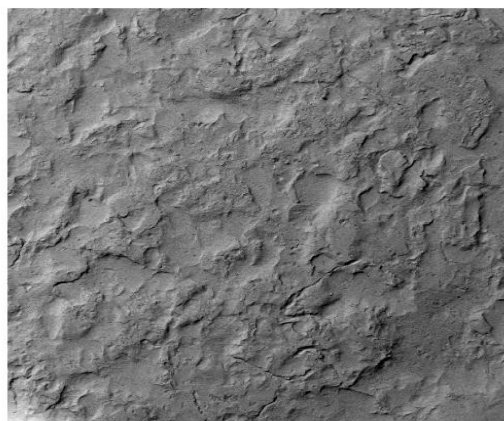
Povrch rotujícího pracovního válce je otryskáván jemným granulátem, který je na tento povrch metán lopatkovým kolem. Na povrchu pracovního válce dochází k místním plastickým deformacím spojeným s deformačním zpevněním tohoto povrchu. Vzniknou tak náhodně rozdělené kráterky, které mají charakteristickou texturu.

Změnou vstupujících parametrů můžeme ovlivnit drsnost vytvářeného povrchu válce. Jde to například změnou obvodové rychlosti lopatkového kola nebo použitím jiného druhu a velikosti tryskacího granulátu. Princip výroby je na obrázku 2.7.1.1.

U válců vyrobených metodou SBT se střední aritmetická hodnota drsnosti  $R_a$  pohybuje mezi 1 – 6  $\mu\text{m}$ . Na obrázku 2.7.1.2 je vidět žárově pozinkovaný povrch vytvořený touto metodou.



Obr. 2.7.1.1: Princip metody SBT

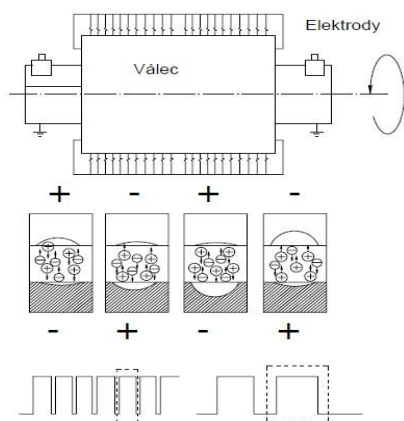


Obr. 2.7.1.2: Povrch žárově pozinkovaného plechu zvětšený 250x

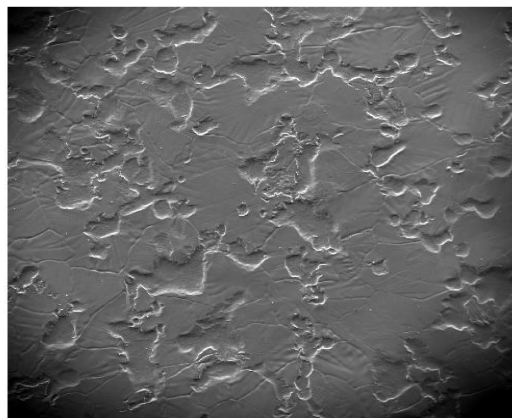
### 2.7.2. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou EDT

Texturování válce se děje v dielektrickém prostředí elektrickým výbojem mezi elektrodou a povrchem válce. Dochází zde k lokálnímu natavení povrchu válce. Drsnost válce lze měnit velikostí napětí a vzdáleností elektrod. Metoda EDT umožňuje dosáhnout většího počtu vrcholků  $R_p$  než metoda SBT a také nižší drsnosti. Princip výroby je na obrázku 2.7.2.1.

U válců vyrobených metodou EDT se střední aritmetická hodnota drsnosti  $R_a$  pohybuje mezi 0,8 – 10  $\mu\text{m}$ . Na obrázku 2.7.2.2 je vidět žárově pozinkovaný povrch vytvořený touto metodou.



Obr. 2.7.2.1: Princip metody EDT



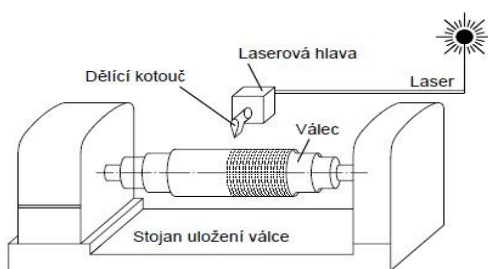
Obr. 2.7.2.2: Povrch žárově pozinkovaného plechu zvětšený 250x

### 2.7.3. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou LT

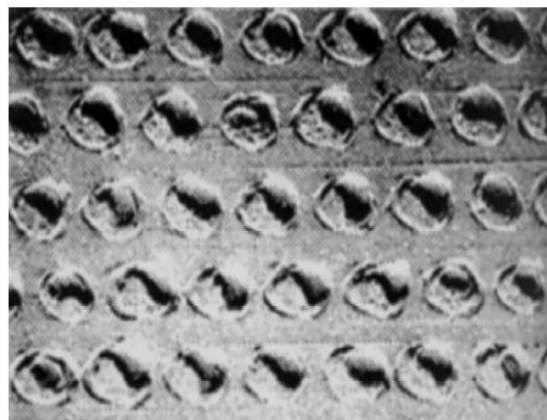
Texturování se provádí pomocí laserového paprsku. Ten natavuje povrch válce a materiál z kráteru se zachycuje okolo tohoto kráteru jako obruba. Pracovní válec se pomalou rychlostí otáčí a posunuje se v axiálním směru. Drsnost lze ovlivnit regulací energie laserového paprsku a rychlostí axiálního a otáčivého pohybu.

Tato metoda má řadu nedostatků jakými jsou třeba dlouhý čas matování, nízká účinnost laseru nebo příliš vysoké náklady. Proto tato metoda nenašla širší uplatnění v praxi. Princip výroby je na obrázku 2.7.3.1.

U válců vyrobených metodou LT se střední aritmetická hodnota drsnosti  $R_a$  pohybuje mezi 0,8 – 10  $\mu\text{m}$ . Na obrázku 2.7.3.2 je vidět charakteristický povrch pracovního válce vytvořený touto metodou.



Obr. 2.7.3.1: Princip metody LT



Obr. 2.7.3.2: Povrch válce vyrobený LT metodou, zvětšený 500x

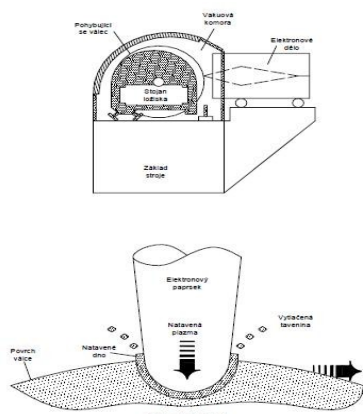
### 2.7.4. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou EBT

Tento princip spočívá v natavování povrchu pracovního válce elektronovým

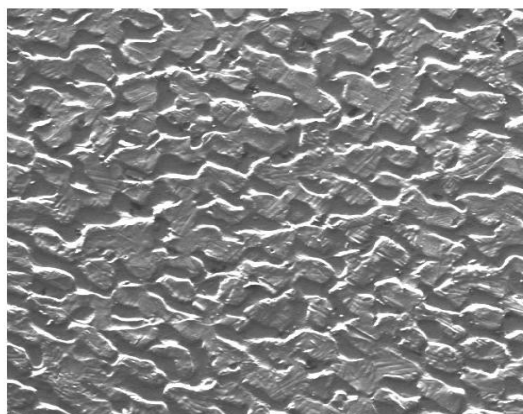


paprskem. Celá technologie probíhá va vakuu. To nám zaručuje, že okraj kráteru je kovově čistý a bez oxidů. Je možné zajistit, aby krátery byly rozprostřeny rovnoměrně po celém povrchu a ve všech směrech. To docílíme regulací otáčení válce a změnou frekvence vystřelování elektronového paprsku. Je také možné zaručit pravidelnou geometrii uspořádání kráterů. Princip výroby je na obrázku 2.7.4.1.

U válců vyrobených metodou EBT se střední aritmetická hodnota drsnosti  $R_a$  pohybuje mezi  $0,4 - 5 \mu\text{m}$ . Na obrázku 2.7.4.2 je vidět charakteristický povrch žárově pozinkovaného plechu získaného touto metodou.



Obr. 2.7.4.1: Princip metody EBT

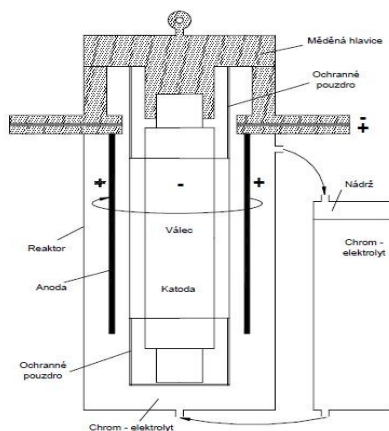


Obr. 2.7.4.2: Povrch plechu vyrobený EBT metodou, zvětšený 250x

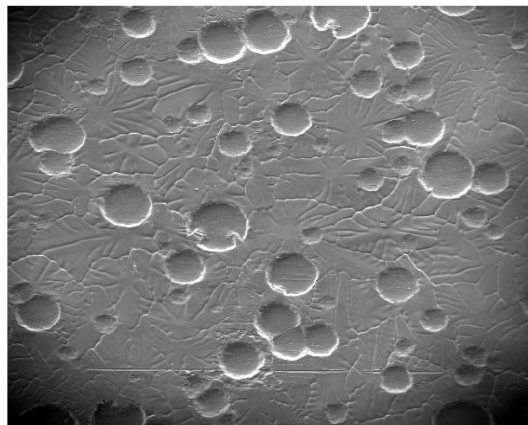
### 2.7.5. Princip texturování povrchu pracovního válce metodou PRETEX

Metoda PRETEX je založena na elektrolytickém vyloučení chromu na povrchu pracovního válce. Princip výroby povrchu válce je na obrázku 2.7.5.1.

U válců vyrobených metodou PRETEX se střední aritmetická hodnota drsnosti  $R_a$  pohybuje mezi  $0,2 - 20 \mu\text{m}$ . Na obrázku 2.7.5.2 je vidět charakteristický povrch žárově pozinkovaného plechu získaného touto metodou.



Obr. 2.7.5.1: Princip metody PRETEX



Obr. 2.7.5.2: Povrch plechu „PRETEX“, zvětšený 250x

### 3. Experimentální část

#### 3.1. Experimentální část obecně

Cílem mé diplomové práce bude posouzení tribologických vlastností mikrofosfátovaných plechů v technologii tažení. Tyto mikrofosfátované plechy budu porovnávat vzhledem k tzv. etalonu, kterým je plech se standardní vrstvou fosfátu. Důvod zkoušky je prostý. Vrstva fosfátu ve spojení s vhodnými mazivy působí v procesu tažení jako mezivrstva mezi nástrojem a základním materiálem a snižuje tak koeficient tření. Naproti tomu není fosfát vhodný u některých dalších technologií výroby, které se v automobilovém průmyslu objevují. Těmi hlavními jsou například svařování, lepení nebo lakování. Vzhledem k příznivému vlivu fosfátu při tažení, ho nemůžeme z technologie zcela vyloučit a proto se zkouší alespoň omezení jeho tloušťky.

Základem všech zkoušených plechů, které dodalo více výrobců, je hlubokotažná ocel s označením DX 56. Pro tento materiál prozatím neexistují normy, protože je stále ve fázi vývoje a ověřování.

Zkoušku budu provádět na experimentálním zařízení pro tribologické zkoušky SOKOL 400, které je umístěno v laboratořích na katedře strojírenské technologie TU v Liberci. Experiment by měl napodobit reálné podmínky vznikající během procesu tažení karosářských plechů v automobilovém průmyslu.

Zvolil jsem typ zkoušky, při které na jednotlivých zkoušených vzorcích bude po určité vzdálenosti stoupat tlak. Tedy zkoušku při vyšších tlacích. Tyto tlaky v reálné podobě při tažení karosářských výlisků skutečně existují. Z průběhu zkoušení mne bude zajímat velikost zátěžné síly, tj. síly kterou jsem nucen vyvinout v závislosti na třecích silách a vzhled povrchu po protažení vzorku. Dalším hlediskem tedy bude vzhled povrchu a jeho poškození.

Použity budou dva typy čelistí. Oba typy jsou ze stejného materiálu GGG-70L. Jde o materiál skutečně používaný na výrobu tažných nástrojů v automobilovém průmyslu. Materiálem je tvárná litina a k dispozici budu mít jeden pár čelistí kalených a druhý pár čelistí nekalených. Bude mne tedy zajímat jak moc se tribologické podmínky změní za použití kalených či nekalených čelistí.

Jedním z dalších vstupujících prvků do zkoušky bude teplota. Myslím tím temperační teplotu čelistí. V reálných podmínkách tváření se některé druhy energie a tření mění na teplo. Vývin tohoto tepla má vliv na různou teplotu nástroje. Temperační teplotu tedy nastavím na hodnotu 70°C, což by mělo zaručit extrémní teplotu vznikající v nástroji.



### 3.1.1. Rozvržení experimentální části

1. Seznámení se zkoušenými materiály
2. Charakteristika čelistí použitých pro zkoušení
3. Vstupní podmínky
4. Vlastní tribologická zkouška na zařízení SOKOL 400
5. Snímkování povrchů testovaných vzorků
6. Měření drsnosti testovaných vzorků
7. Vyhodnocení získaných dat

### 3.2. Testované materiály

Základem všech vzorků je hlubokotažná ocel síly 0,8mm s označením DX 56. Pro tento materiál prozatím neexistují normy, protože je stále ve fázi vývoje a ověřování. Jednotlivé zkoušené vzorky budou mít nastříhané na rozměr 0,8x45x1000mm.

**HDG +  $\mu$ Ph TKS** hot dip galvanized with microphosphate,  
žárově pozinkovaný materiál s mikrofosfátovou vrstvou

**HDG +  $\mu$ Ph Voest** hot dip galvanized with microphosphate,  
žárově pozinkovaný materiál s mikrofosfátovou vrstvou

**HDG +  $\mu$ Ph US Steel** hot dip galvanized with microphosphate,  
žárově pozinkovaný materiál s mikrofosfátovou vrstvou

**HDG + NIT** hot dip galvanized with phosphate,  
žárově pozinkovaný materiál s mikrofosfátovou vrstvou

**EG + Ph** electrolytic galvanized with phosphate,  
elektrolyticky pozinkovaný materiál s fosfátovou vrstvou

**EG + NST Arcelor** electrolytic galvanized with microphosphate,  
elektrolyticky pozinkovaný materiál s fosfátovou vrstvou

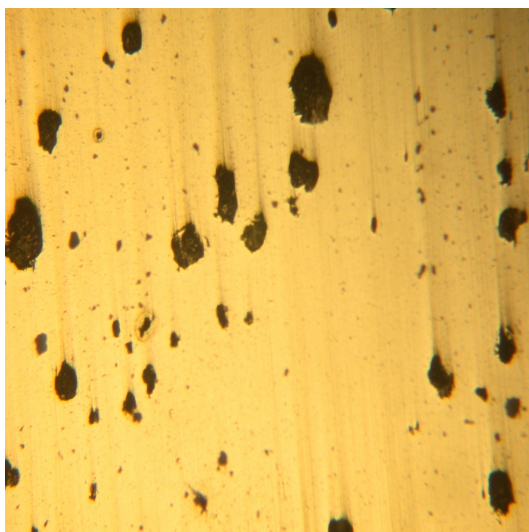
Jak už jsem zmínil v úvodu, jednotlivé materiály budu porovnávat vzhledem k tzv. etalonu. Tím porovnávacím substrátem je *EG+Ph*. Je to materiál, který se v současnosti běžně používá v automobilovém průmyslu.

Tab. 3.2.1: Rozdíl fosfátových vrstev

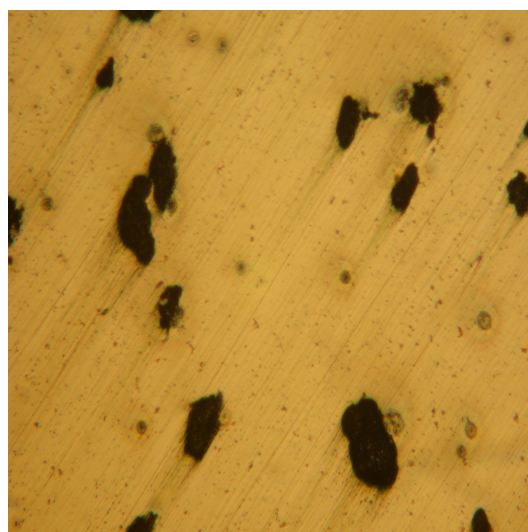
Povrchová úprava	Fosfát	Mikrofosfát
Produkt	Granodine 5852 Henkel	Granodine 5852 Henkel
Tloušťka	1,5 g/m <sup>2</sup> (0,2-0,3μm)	50-100 mg/m <sup>2</sup>
Složení	Vrstva PO 4 1% Nikl 3,5% Mangan 30% Zinek	Vrstva PO4 3,6% Magnesium 42% Zinek
Aplikace	Spray	CoilTech
Počet stupňů	3	1
Kontaktní čas	6s	1-2s
Teplota	50°C	Pokojová teplota

### 3.3. Charakteristika použitých čelistí

Základním materiálem čelistí je tvárná litina označována jako GGG-70 (interní označení koncernu VW dle normy DIN 1693). Budu používat dva typy čelistí, jeden pár čelistí tepelně nezpracovaných a druhý pár kalený a popuštěný. Oba druhy byly zpracovány nejprve broušením a poté leštěním. Na obrázcích 3.3.1 a 3.3.2 je vidět povrch čelistí, tvar a rozložení grafitu ve 100x zvětšení. Fotky byly pořízeny na světelném mikroskopu Neophot21.



Obr. 3.3.1: Povrch kalených čelistí  
100x zvětšený [10]



Obr. 3.3.2: Povrch nekalených čelistí  
100x zvětšený [10]

#### Charakteristika materiálu kalených čelistí:

- Chemické složení  $C = 0,75 \div 0,85\%$ ,  $Mn = 1,85 \div 2,5\%$ ,  $P \leq 0,03\%$ ,  
 $S \leq 0,035\%$ ,  $Si = 0,15 \div 0,35\%$ ,  $V = 0,1 \div 0,2\%$
- Tvrdost HRC  
1. čelist – 45 – 50 HRC  
2. čelist – 46 – 56 HRC
- Drsnost čelistí  $Ra = 0,258 \mu m$ ,  $RPc = 1,6 \text{ l/cm}$

#### Charakteristika materiálu nekalených čelistí:

- Chemické složení  $C = 3,2 \div 3,4\%$ ,  $Mn = 0,3 \div 0,8\%$ ,  $Si = 1,8 \div 2,4\%$ ,  
 $P \leq 0,05\%$ ,  $S \leq 0,01\%$ ,  $Cu \approx 1,0\%$ ,  $Ni \approx 1,0\%$ ,  
 $Mo \approx 0,5\%$
- Drsnost čelistí  $Ra = 0,146 \mu m$ ,  $RPc = 0,8 \text{ l/cm}$

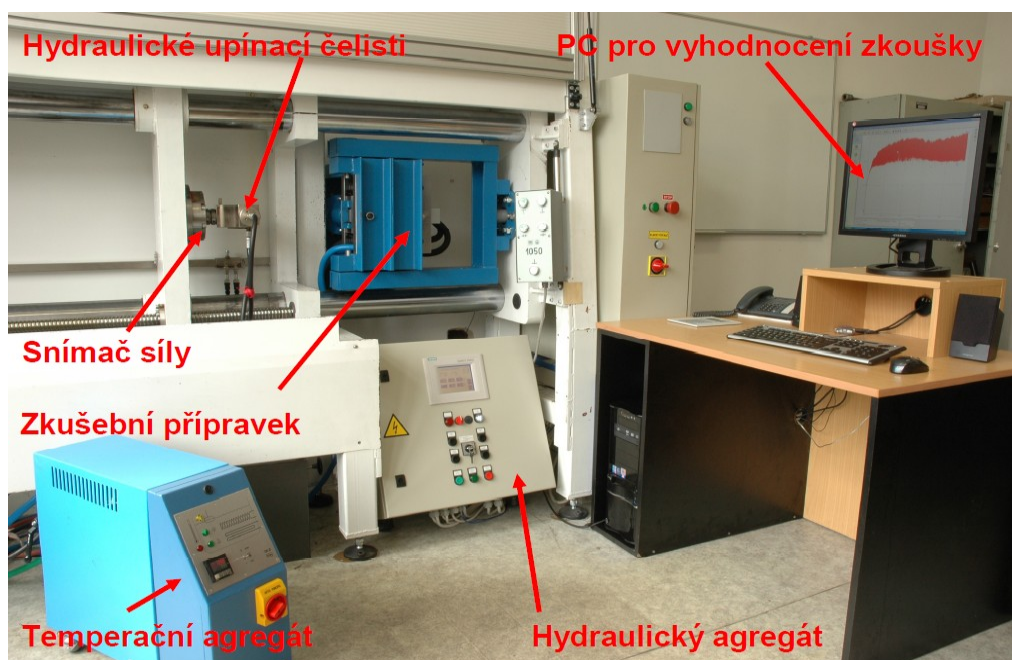
### **3.4. Vstupní podmínky**

1. Měření provedu na párech kalených a nekalených čelistí – oba dva typy čelistí jsou ze stejného materiálu GGG-70L. Je to tvárná litina ze které se lisovací nástroje pro automobilový průmysl skutečně vyrábí. Rozměr dosedací plochy čelistí je 20x20mm s náběhem ve směru posuvu plechu  $5 \times 3^\circ$ . Povrch čelistí budu před každou sérií zkoušek leštit, abych zachoval totožnou drsnost a neměnnost podmínek.
2. Čelisti budou temperovány na teplotu  $70^\circ C$  – abych splnil reálné podmínky vznikající při tváření, musím nejprve ohřát čelisti na určitou teplotu. Při tažení vzniká teplo v nástroji vlivem přeměny energie a tření. Průměrná teplota v nástroji je mezi  $40 - 60^\circ C$ . Protože je tato teplota průměrná a v některých oblastech nástroje jsou tedy současně teploty nižší a v jiných vyšší, volím teplotu  $70^\circ C$ .
3. Definované tlaky - 8, 23, 38, 53, 68, 83Mpa – jak již bylo zmíněno, vzorky budu testovat oblastech vyšších kontaktních tlaků. Postupně na každém jednotlivém vzorku budu po 100mm jeho ujeté dráhy měnit tlak čelistí na materiál a porovnávat tak změnu koeficientu tření a vzhledu povrchu.
4. Rychlost posuvu stanovena na 1mm/s.
5. Použiji mazivo ANTICORIT PL 3802-39S

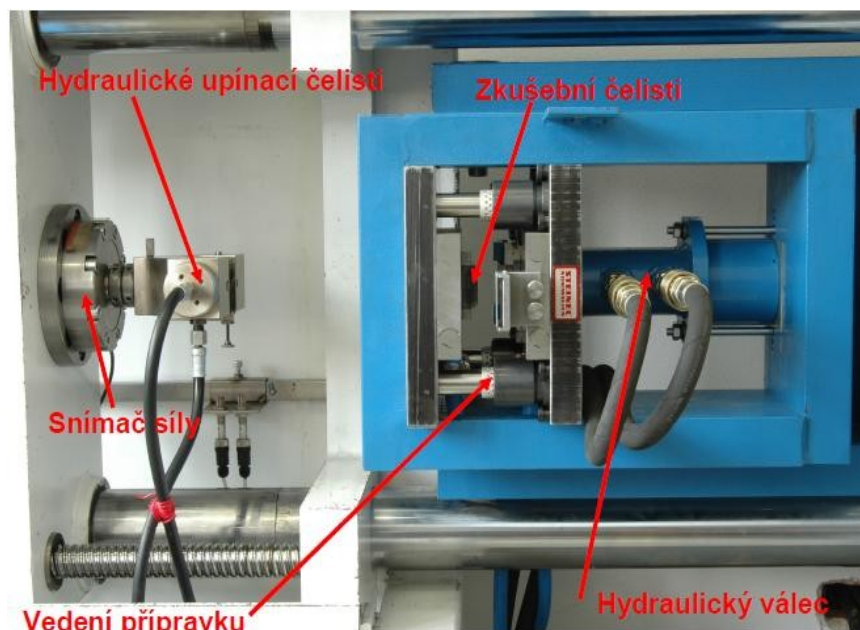
### 3.5. Vlastní tribologická zkouška na zařízení SOKOL 400

Pro experiment jsem použil zařízení SOKOL 400 umístěné na Technické univerzitě v Liberci. Zařízení SOKOL 400, které je na obrázku 3.5.1 je složeno z pevného rámu stroje, hydraulických upínacích čelistí s tenzometrickým snímačem síly, zkušebního přípravku pro upnutí čelistí (viz obr. 3.5.2) a přidruženého příslušenství v podobě hydraulického agregátu, temperačního agregátu a počítače s programem Labtest pro vyhodnocení zkoušky. Jednotlivé díly:

- Zkušební příravek – je znázorněn na obrázku 3.5.2. Zkušební příravek se upne mezi dvě základové desky, které jsou spojeny sloupkovým vedením a jejichž pohyb je způsoben silou hydraulického válce na jednu z desek. Druhá deska nástroje je pevná a nepohybuje se.
- Hydraulické upínací čelisti – slouží k upnutí měřeného materiálu. Upínací čelisti jsou vybaveny tenzometrickým snímačem síly a jako celek se pomocí supportu pohybují v horizontální rovině. Celý support je veden pomocí dvou vodících tyčí a jeho posuv je přenášen párem pohybových kuličkových šroubů.
- Temperační agregát – je zdrojem tepla pro čelisti.
- Hydraulický agregát – je opatřen vlastním dotykovým displayem. Na dotykovém displayi jsem nastavil průběh zkoušky, posuv a jednotlivé tlaky.
- Počítač pro vyhodnocení zkoušky se softwarem LabTest.



Obr. 3.5.1: Měřicí zařízení sokol



Obr. 3.5.2: Zkušební přípravek

Tab. 3.5.1: Technické parametry zařízení SOKOL 400

Rychlost posuvu [mm/s]	1 – 400
Maximální síla $F_t$ [kN]	20
Teplota [°C]	5 – 98
Frekvence snímání dat [kHz]	10
Maximální měřená délka [mm]	1200

Síla přenášená čelistmi je vyvozena hydraulickým mechanismem. Plocha pístu hydraulického mechanismu je  $3120\text{mm}^2$  a plocha čelistí je  $400\text{mm}^2$ . Musím tedy nejdříve přepočítat nastavovaný tlak. Ten vypočítám ze vzorce

$$p_1 \cdot S_1 = p_2 \cdot S_2, \text{ kde} \quad (18)$$

$p_1$  ... je tlak zařízení SOKOL 400 [MPa]

$S_1$  ... je plocha pístu zařízení SOKOL 400 [ $\text{mm}^2$ ]

$p_2$  ... je nastavovaný tlak [MPa]

$S_2$  ... je plocha čelistí [ $\text{mm}^2$ ]

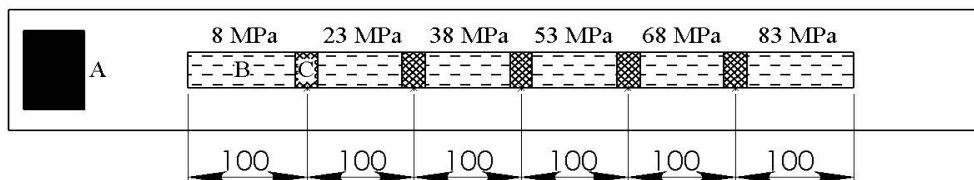
Poměr plochy pístu a čelistí je 7,8. Pokud tedy chci zachovat rovnost tlaků působícího pístu a čelistí, musím na displayi hydraulického agregátu nastavovat tlaky 7,8 krát menší. Navíc se hodnoty tlaku na zařízení Sokol 400 nastavují v barech ( $1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa}$ ). V tabulce 3.5.2 jsou přepočítané a nastavované hodnoty tlaků.

Tab. 3.5.2: Tabulka nastavovaných hodnot na hydraulickém agregátu

Tlak [MPa]	Přepočítaný tlak [MPa]	Nastavovaný tlak [bar]
8	1,03	10,3
23	2,95	29,5
38	4,87	48,7
53	6,79	67,9
68	8,72	87,2
83	10,64	106,4

### 3.5.1. Postup měření na zařízení SOKOL 400

Čelisti řádně vyleštím a změřím jejich drsnost. Poté je upnu mezi základové desky zkušebního zařízení. Jakmile budou čelisti vyhřáté na temperační teplotu, vezmu zkoušený vzorek a nanesu na něj požadované množství maziva ANTICORIT PL 3802-39S, které činí 1,5 g/m<sup>2</sup>. Poté ho vsunu mezi čelisti a konec vzorku upnu do hydraulických upínacích čelistí. Jakmile je pásek upnut, mohu začít s měřením. Zapnu automatický chod stroje a vstup zápisu dat do počítače. Zařízení pak samo zvýší tlak po předem definované vzdálenosti 100mm. Po dojetí zkoušeného materiálu do koncové polohy se vypne zápis dat do počítače, vyjme se zkoušený vzorek a celý postup se opakuje. Na obrázku 3.5.1.1 je schématické znázornění pásku po zkoušce tahem.



Obr. 3.5.1.1: Pásek materiálu po tribologické zkoušce

A – oblast uchopení čelistmi, B – oblast působení tlaku,

C- oblast přechodu tlaků

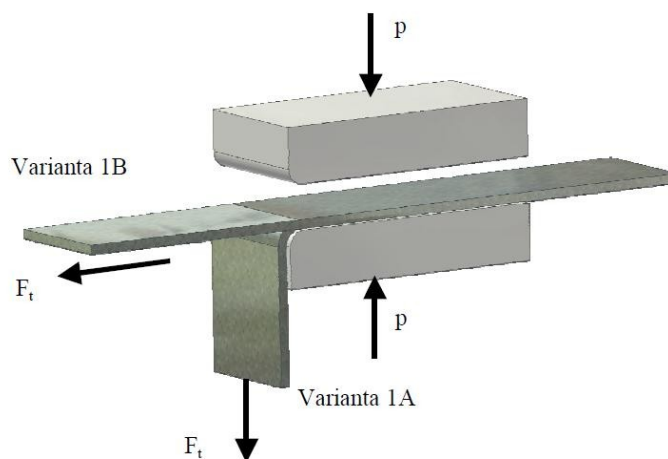
### 3.5.2. Princip zkoušky a hodnocení tribologických vlastností

Na obrázku 3.5.2.1 můžeme vidět princip tribologické zkoušky ve variantách 1A a 1B. Obě spočívají v protahování zkoušeného pásku mezi čelistmi. Pro vlastní zkoušení jsem zvolil metodu 1B, tedy zkoušku tření mezi přidržovačem a tažnicí popsanou v kap. 2.5.1. Charakteristický průběh zkoušky při vyšších kontaktních tlacích je na obrázku 3.5.2.2. a na obrázku 3.5.2.3 je znázorněno pozdější grafické vyhodnocení.

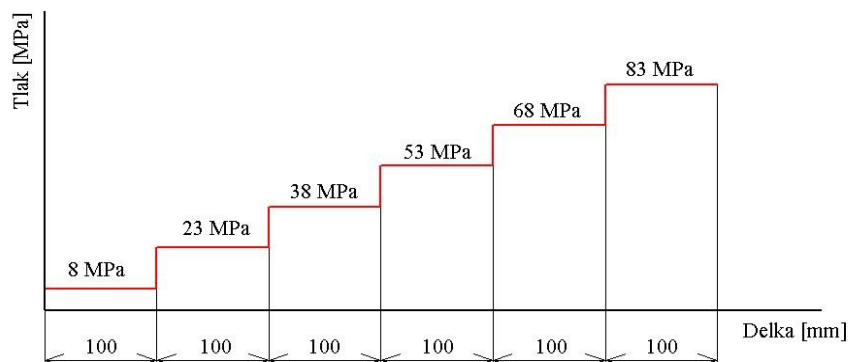
Hodnoty se kterými budu počítat jsou z tzv. ustálené oblasti. To je oblast měření při

protažení 30mm pásku po každém zvýšení tlaku. Tato oblast již není ovlivněna změnou tlaku. Z grafického vyhodnocení, které je na obrázku 3.5.2.3 pak dostanu tyto veličiny:

- $F_{\max}$  – maximální velikost síly z celého průběhu zkoušky
- $F_{\min}$  – minimální velikost síly v ustálené oblasti
- $F_h$  – maximální velikost síly v ustálené oblasti
- $F_s$  – střední velikost síly v ustálené oblasti



Obr. 3.5.2.1: Princip tribologické zkoušky



Obr. 3.5.2.2: Průběh zkoušky při vyšších tlacích

Jestliže známe tažnou sílu  $F_{TAŽNÁ}$ , pomocí které protahujeme testovaný vzorek čelistmi, plochu čelistí a tlak působící skrze čelisti, jsme schopni vypočítat součinitele tření

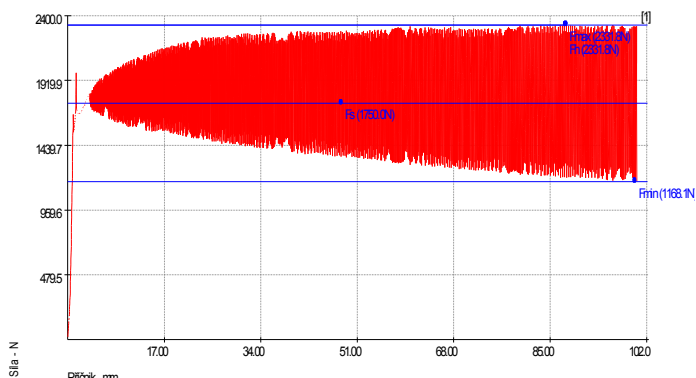
ze vzorce 
$$\mu = \frac{F_{TAŽNÁ}}{2pS} . \quad (19)$$

Tažnou sílu budu aplikovat ve dvou formách, tedy místo  $F_{TAŽNÁ}$  budu počítat s maximální a



střední velikostí síly  $F_h$  a  $F_s$ . Důvodem je vznik tzv. Stick-slip efektu, který se při zkoušce materiálů s povlaky vyloženě nabízí. Vypočtené hodnoty součinitelů tření budou z těchto dvou různých aplikací vzorců

$$\mu_h = \frac{F_h}{2pS} \text{ a } \mu_s = \frac{F_s}{2pS} . \quad (20), (21)$$



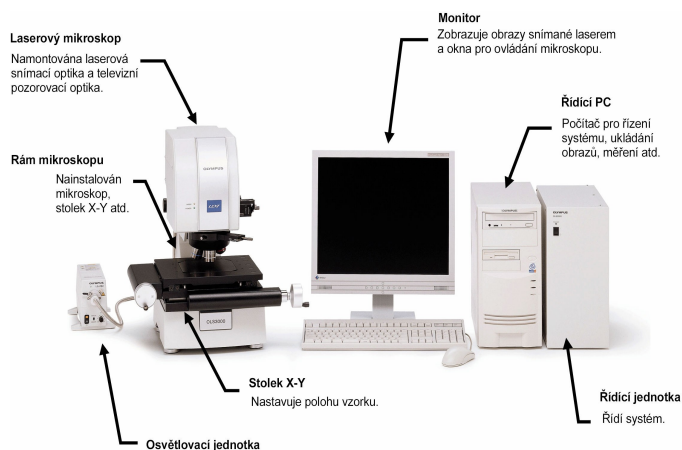
Obr. 3.5.2.3: Charakteristické grafické znázornění zkoušky

### 3.6. Snímkování povrchů testovaných vzorků

Nafotit testované substráty jsem odjel do areálu vzdělávacího centra Na Karmeli, kde má v novostavbě své sídlo Škoda Auto Vysoká škola. Snímky jsem pořizoval na Konfokálním rastrovacím laserovém mikroskopu LEXT OLS 3000.

#### 3.6.1. Konfokální rastrovací laserový mikroskop LEXT OLS 3000 [7]

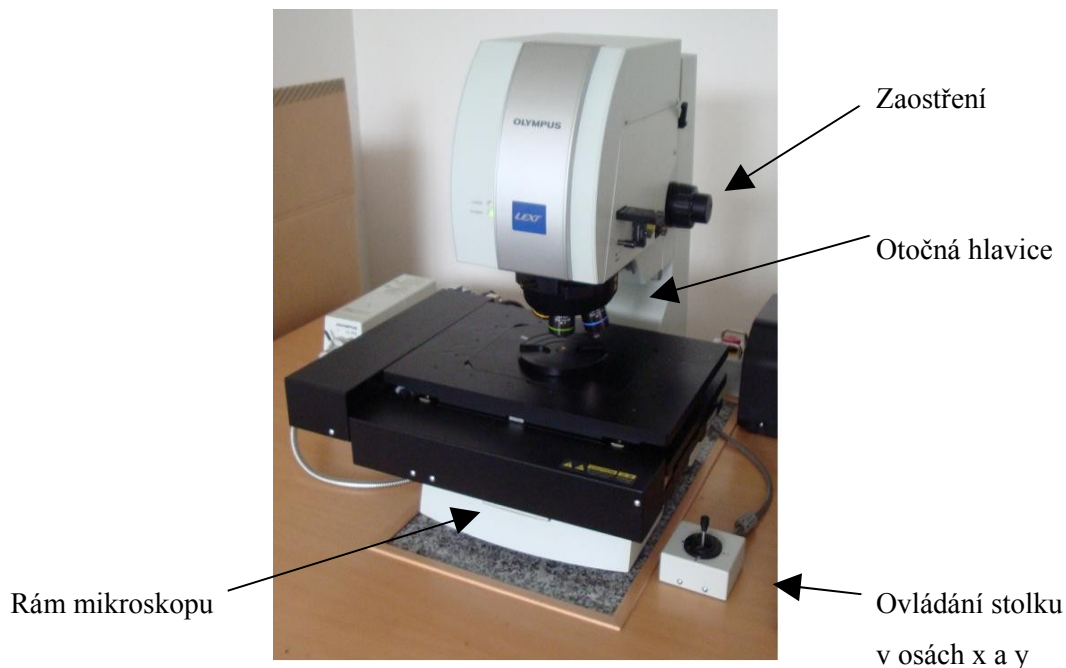
Mikroskopem LEXT OLS 3000 lze získat 2D obrazy a 3D obrazy sledovaných povrchů ve vysoké kvalitě. Měří šířku čáry a profil výškového rozdílu v různých režimech zobrazení. Na obrázku 3.6.1.1 je vidět používaný mikroskop včetně přidruženého příslušenství.



Obr. 3.6.1.1: Laserový mikroskop včetně příslušenství [6]



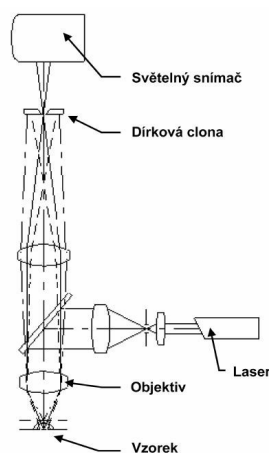
Popis funkčních částí laserového mikroskopu, které jsem používal je na obrázku 3.6.1.2.



Obr. 3.6.1.2: Funkční části mikroskopu

### 3.6.2. Princip mikroskopu LEXT OLS 3000

Princip konfokálního mikroskopu je na obrázku 3.6.2.1. Mikroskop svým objektivem zaměřuje laserový paprsek na velmi malý bod a pohybuje jím po vzorku ve směrech os x a y. Detektor poté zachytí světlo od vzorku a přenesení obraz na monitor. V konfokální rovině je umístěna clona s dírkou, která odstraňuje světlo dopadající z míst mimo polohu zaostření. V místech, kde se toto světlo odstraní, se místa povrchu zcela zatemní a prostorový vzorek je pak možné rozdělit na optické řezy. U běžných mikroskopů se dopadající světla překrývají a obraz tím může být rozmazaný.



Obr. 3.6.2.1: Princip konfokálního mikroskopu

### 3.6.3. Popis snímkování vzorků

Při samotném měření jsem jednotlivě pokládal pásy na stolek mikroskopu a fotil povrch, který vznikl třením pásu o přitlačovanou čelist. Snímky jsou pořizovány v místech (viz. Obr. 3.6.3.1), kde jsem po nafocení měřil i drsnost povrchu. Tzn. vždy uprostřed oblasti působení jednotlivých tlaků. Pro snímkování jsem použil objektiv s dvacetinásobným zvětšením, což po přepočítání má za pomoci optického zoomu 480-ti násobné zvětšení povrchu. Nejdříve jsem vyfotil povrch ve 2D a poté ve 3D.

Pokud jde o 3D izometrický pohled povrchu, byly použity z důvodu odstranění chyb vzniklých šumem následující typy filtrů:

- Noise removal for Convexity
- Spike removal
- Smoothing



Obr. 3.6.3.1: Oblasti snímkování vzorků

### 3.7. Měření hodnot drsností

Geometrie povrchu dotýkajících se těles má přímý vliv na proces tření a z toho plynoucí proces opotřebení. Tyto povrchy mají určité geometrické, fyzikální, chemické a jiné vlastnosti, které vyjadřují kvalitu daného povrchu. Základním způsobem hodnocení kvality povrchu je měření drsnosti. Hodnota naměřené drsnosti je pak charakterizována určitou normou daných veličin. Pro hodnocení povrchu se ustálily některé základní parametry (viz. kap. 2.2) a těmi hlavními, které budu měřit jsou:

1. Střední aritmetická hodnota měřeného profilu  $R_a$
2. Počet výstupků měřeného profilu  $R_{Pc}$
3. Maximální výška měřeného profilu  $R_z$

#### 3.7.1. Měřicí zařízení MarSurf PS1 [11]

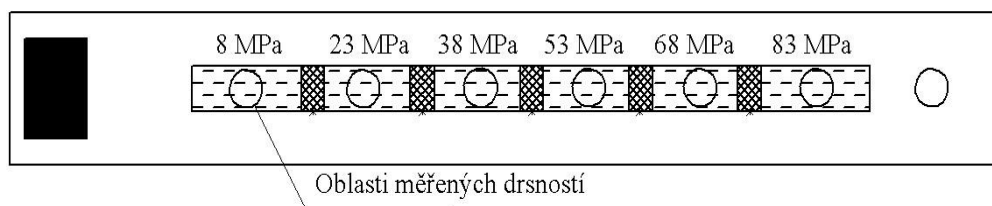
Na měření byl použit přenosný přístroj pro měření jakosti povrchu MarSurf PS1 (viz. Obr. 3.7.1.1). Přístroj je flexibilní, přenosný a zajišťuje správné výsledky měření i pro nekvalifikovaného pracovníka. Lze jej použít v jakékoliv poloze. Měří vodorovně, svisle i zespodu. Délka snímaná přístrojem je 17,5mm.



Obr. 3.7.1.1: Přístroj MarSurf PS1 pro měření drsnosti [11]

### 3.7.2. Postup měření parametrů drsnosti

Na obrázku 3.7.2.1 jsou schematicky znázorněna místa, kde jsem měřil hodnoty drsnosti. Každému vzorku jsem změřil drsnost uprostřed pracovních oblastí jednotlivých zatížení a mimo pracovní oblast zatížení, tedy na konci pásku (oblast nezasažená zkouškou). Každou oblast jsem změřil třikrát z obou stran testovaného vzorku. Výsledné hodnoty jsou zprůměrované.



Obr. 3.7.2.1: Oblasti měřených drsností

#### 4. Výsledky experimentální části

##### 4.1. Výsledné tabulkové a grafické hodnoty součinitelů tření pro kalené čelisti

Tab. 4.1.1: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek HDG +  $\mu$ Ph TKS

HDG + $\mu$ Ph TKS						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,126	0,145	0,136	0,118	0,095	0,076
$\mu_h$	0,150	0,186	0,190	0,174	0,141	0,114

Tab. 4.1.2: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek HDG +  $\mu$ Ph Voest

HDG + $\mu$ Ph Voest						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,139	0,157	0,146	0,124	0,101	0,083
$\mu_h$	0,163	0,202	0,209	0,186	0,152	0,127

Tab. 4.1.3: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek HDG +  $\mu$ Ph US Steel

HDG + $\mu$ Ph US Steel						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,139	0,157	0,138	0,113	0,079	0,071
$\mu_h$	0,162	0,198	0,203	0,172	0,127	0,101

Tab. 4.1.4: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek HDG + NIT

HDG + NIT						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,120	0,116	0,100	0,091	0,084	0,078
$\mu_h$	0,146	0,131	0,108	0,098	0,088	0,082

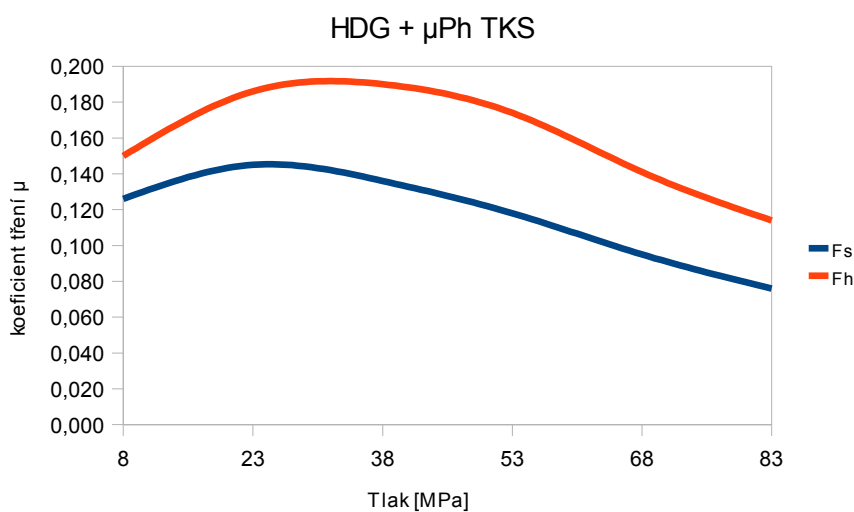
Tab. 4.1.5: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek EG + Ph

EG + Ph						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,146	0,148	0,145	0,150	1,106	0,091
$\mu_h$	0,174	0,164	0,157	0,213	1,127	0,106

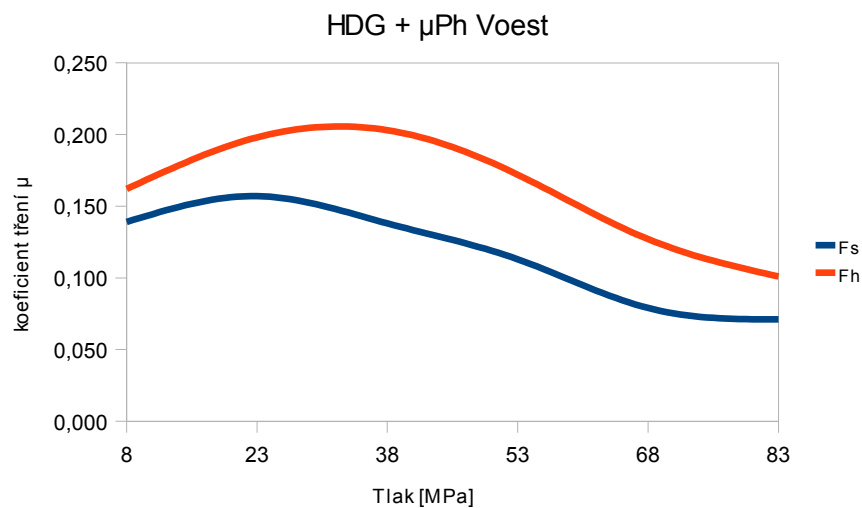
Tab. 4.1.6: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek EG + NST Arcelor

EG + NST Arcelor						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,259	0,291	-	-	-	-
$\mu_h$	0,311	0,317	0,321	-	-	-

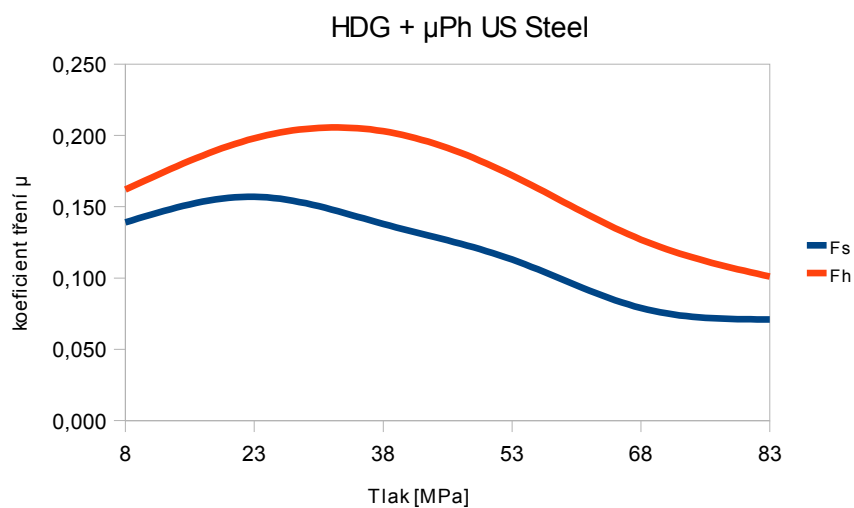
#### 4.1.1. Grafické závislosti koeficientu tření na tlaku pro maximální a střední velikost síly pro kalené čelisti



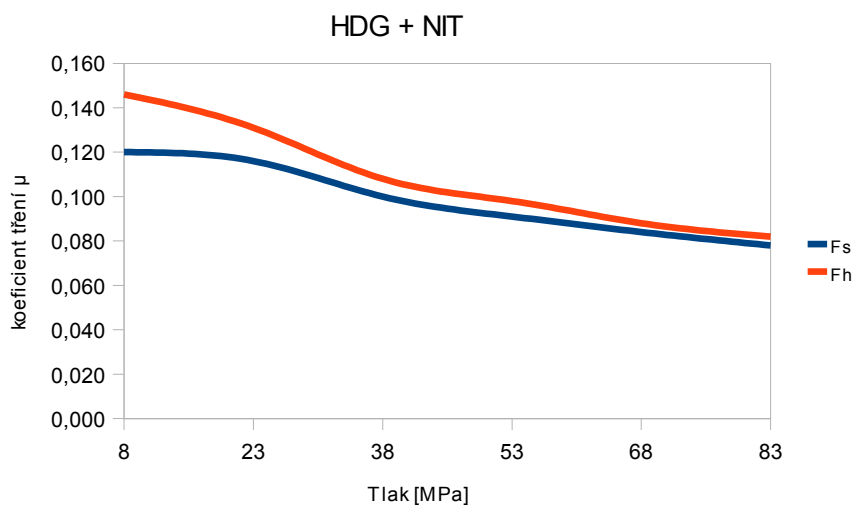
Obr. 4.1.1.1: Závislost koeficientu tření na tlaku HDG+ $\mu$ Ph TKS



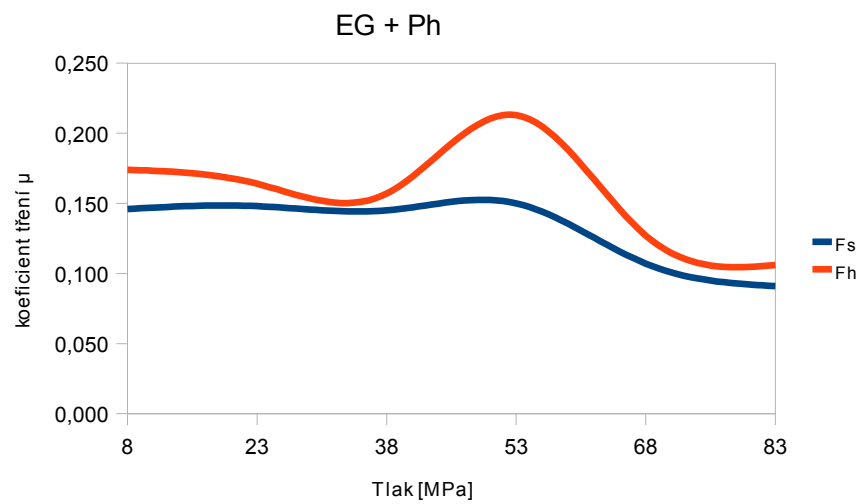
Obr. 4.1.1.2: Závislost koeficientu tření na tlaku HDG+ $\mu$ Ph Voest



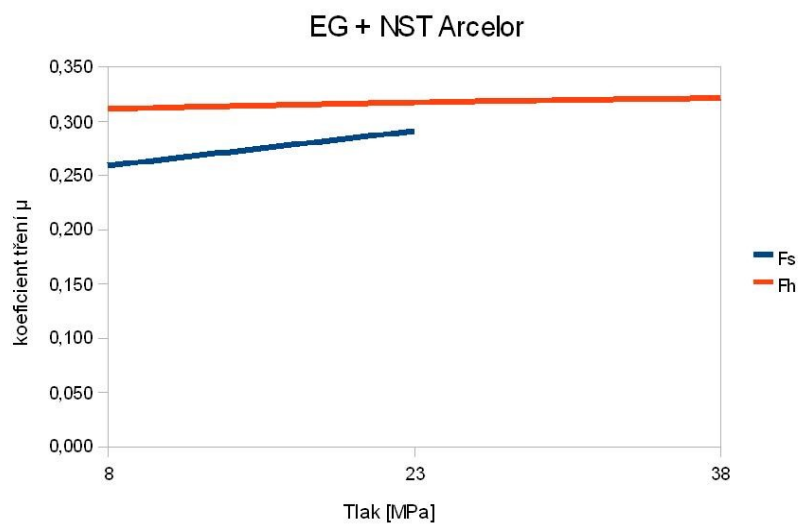
Obr. 4.1.1.3: Závislost koeficientu tření na tlaku HDG+ $\mu$ Ph US Steel



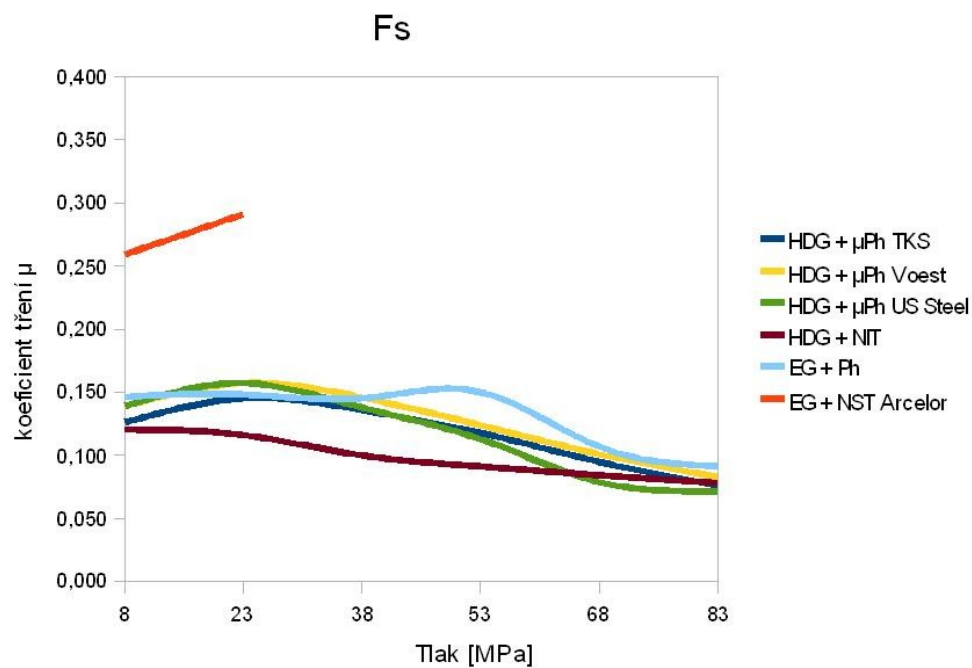
Obr. 4.1.1.4: Závislost koeficientu tření na tlaku HDG+NIT



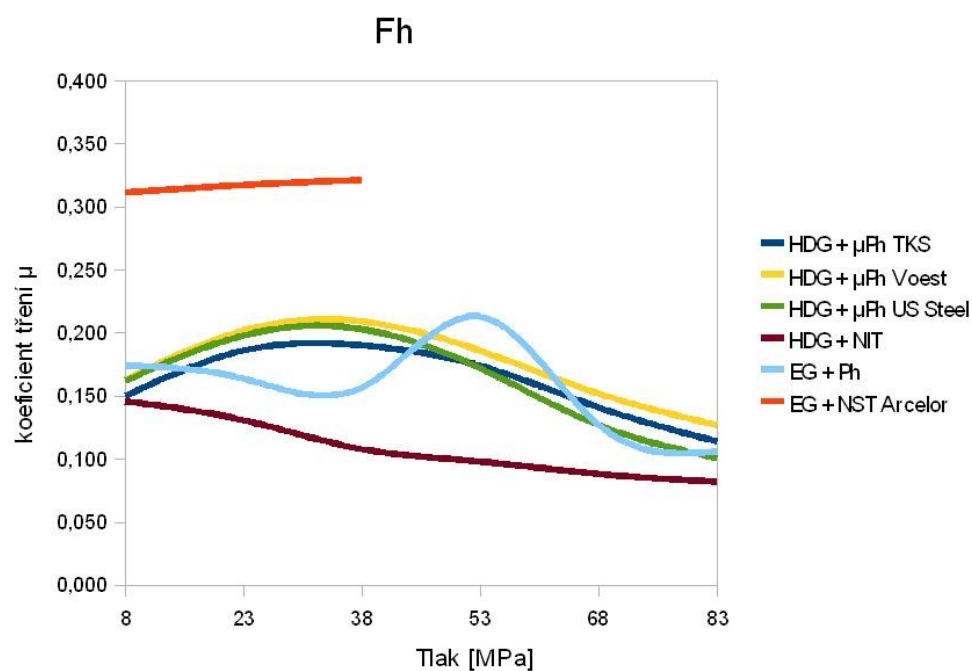
Obr. 4.1.1.5: Závislost koeficientu tření na tlaku EG+Ph



Obr. 4.1.1.6: Závislost koeficientu tření na tlaku EG+NST Arcelor



Obr. 4.1.1.7: Závislost koeficientu tření na tlaku, souhrnné výsledky pro Fs



Obr. 4.1.1.8: Závislost koeficientu tření na tlaku, souhrnné výsledky pro Fh



#### 4.2. Výsledné tabulkové a grafické hodnoty součinitelů tření pro nekalené čelisti

Tab. 4.2.1: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek HDG +  $\mu$ Ph TKS

HDG + $\mu$ Ph TKS						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,096	0,129	0,126	0,109	0,090	0,070
$\mu_h$	0,125	0,170	0,178	0,163	0,139	0,114

Tab. 4.2.2: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek HDG +  $\mu$ Ph Voest

HDG + $\mu$ Ph Voest						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,116	0,156	0,088	0,126	0,100	0,081
$\mu_h$	0,149	0,221	0,228	0,197	0,158	0,131

Tab. 4.2.3: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek HDG +  $\mu$ Ph US Steel

HDG + $\mu$ Ph US Steel						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,135	0,160	0,130	0,152	-	-
$\mu_h$	0,173	0,184	0,162	0,220	0,185	-

Tab. 4.2.4: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek HDG + NIT

HDG + NIT						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,114	0,142	0,132	0,105	0,085	0,071
$\mu_h$	0,145	0,187	0,188	0,154	0,125	0,104

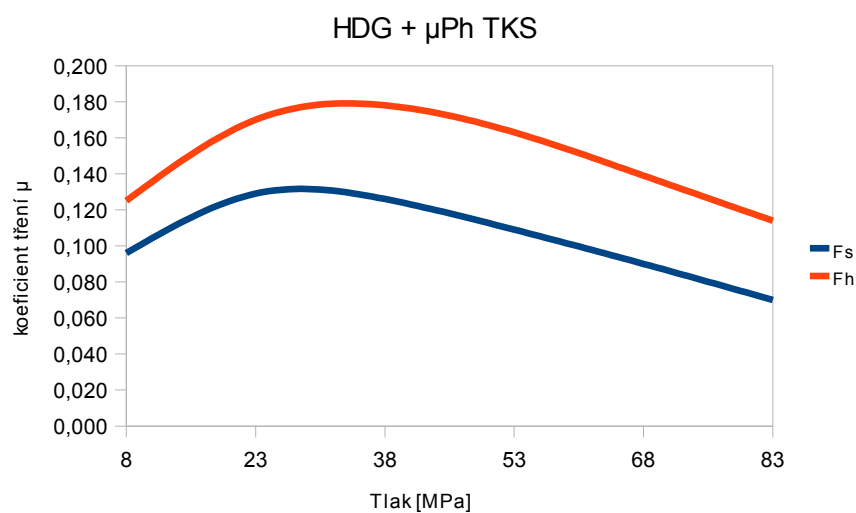
Tab. 4.2.5: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek EG + Ph

EG + Ph						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,159	0,172	0,161	0,129	0,116	0,082
$\mu_h$	0,195	0,192	0,175	0,158	0,170	0,096

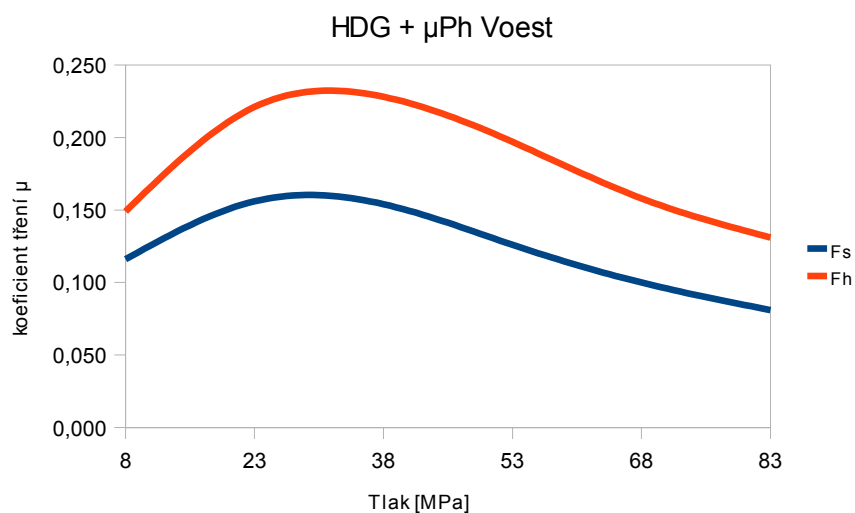
Tab. 4.2.6: Hodnoty koeficientu tření pro maximální ( $\mu_h$ ) a střední ( $\mu_s$ ) velikost síly v ustálené oblasti pro vzorek EG + NST Arcelor

EG + NST Arcelor						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
$\mu_s$	0,221	0,343	-	-	-	-
$\mu_h$	0,260	0,373	0,318	-	-	-

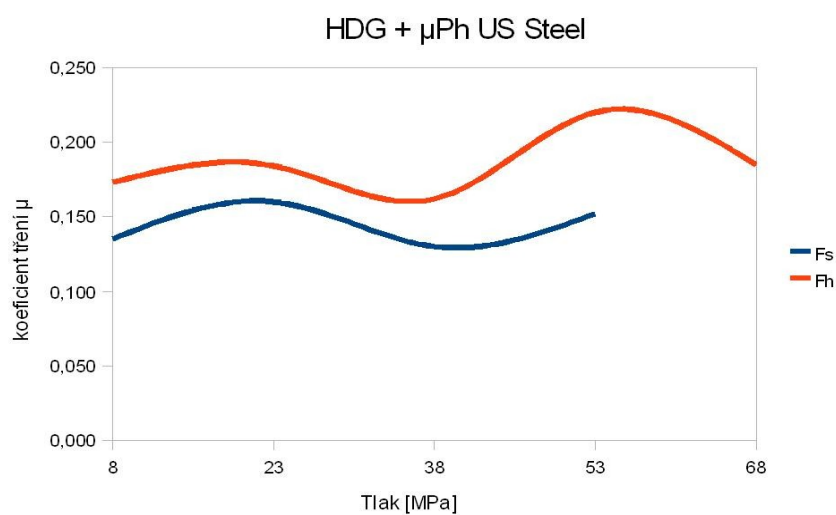
#### 4.2.1. Grafické závislosti koeficientu tření na tlaku pro maximální a střední velikost síly pro nekalené čelisti



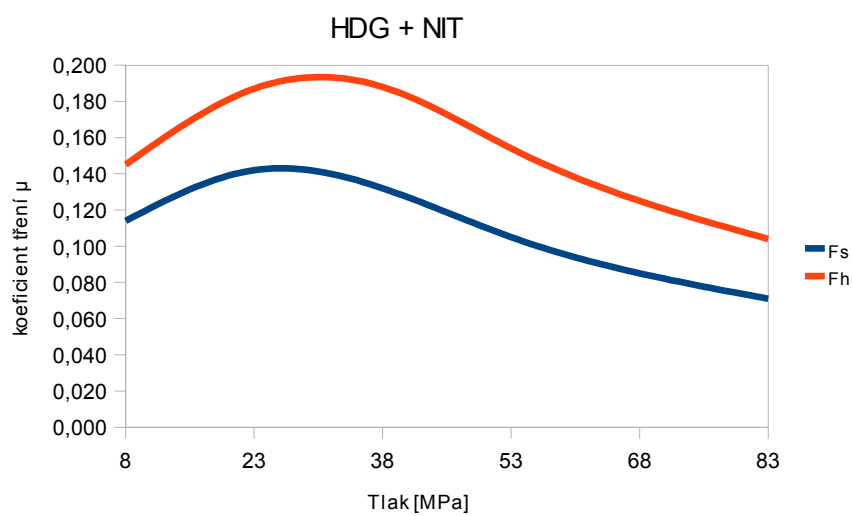
Obr. 4.2.1.1: Závislost koeficientu tření na tlaku HDG+ $\mu$ Ph TKS



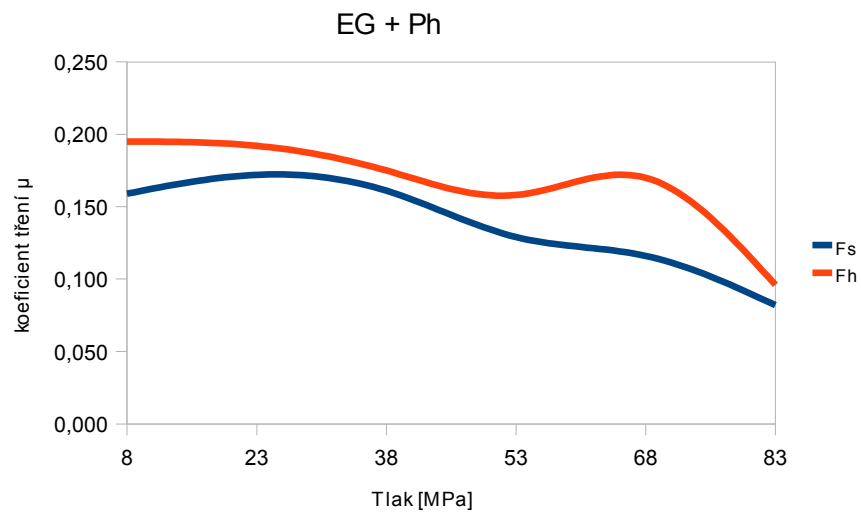
Obr. 4.2.1.2: Závislost koeficientu tření na tlaku HDG+ $\mu$ Ph Voest



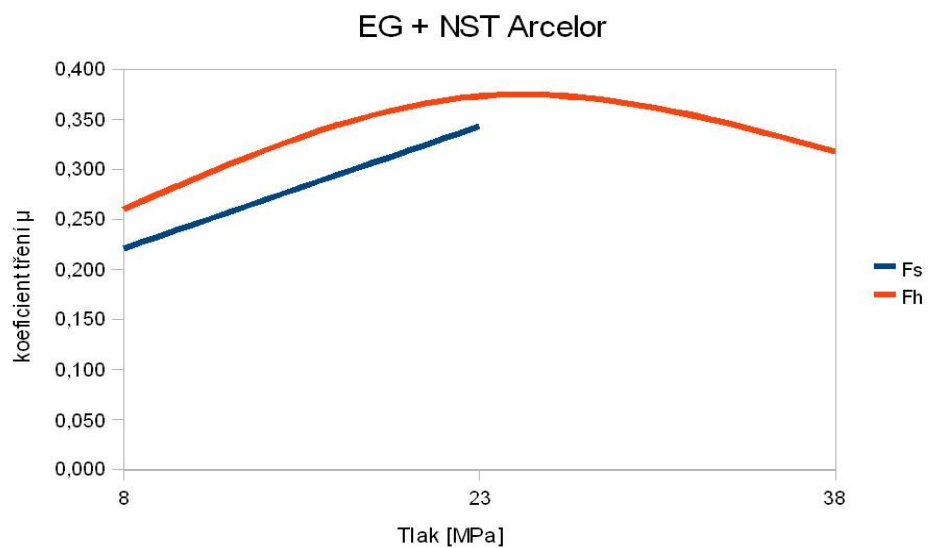
Obr. 4.2.1.3: Závislost koeficientu tření na tlaku HDG+ $\mu$ Ph US Steel



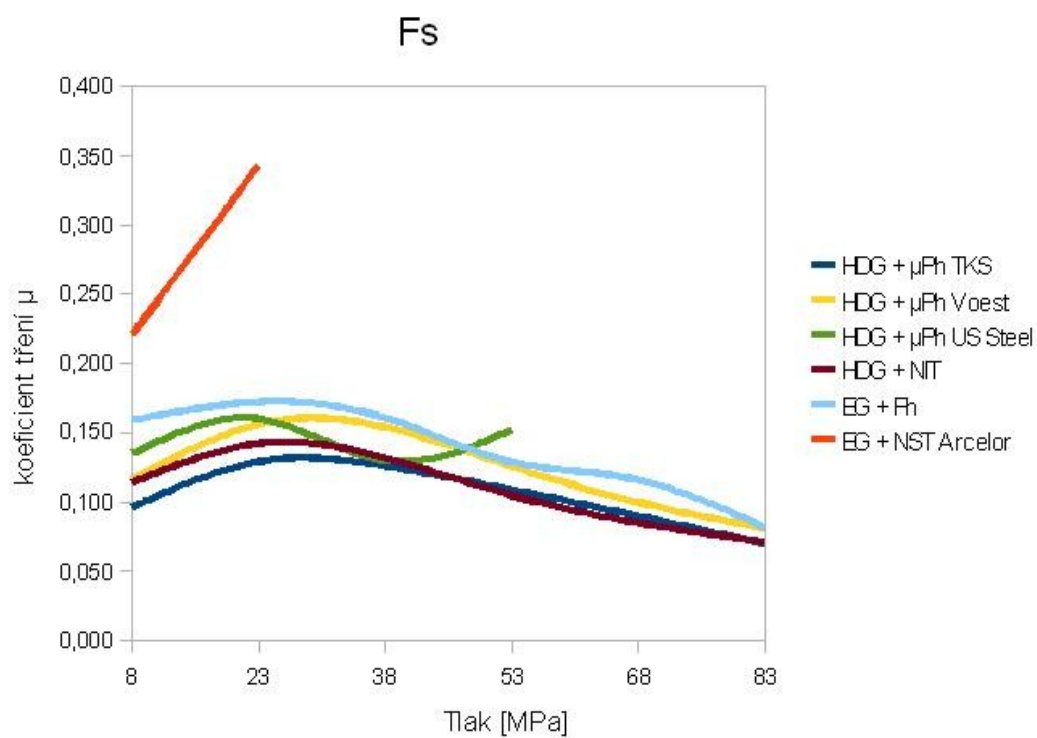
Obr. 4.2.1.4: Závislost koeficientu tření na tlaku HDG+NIT



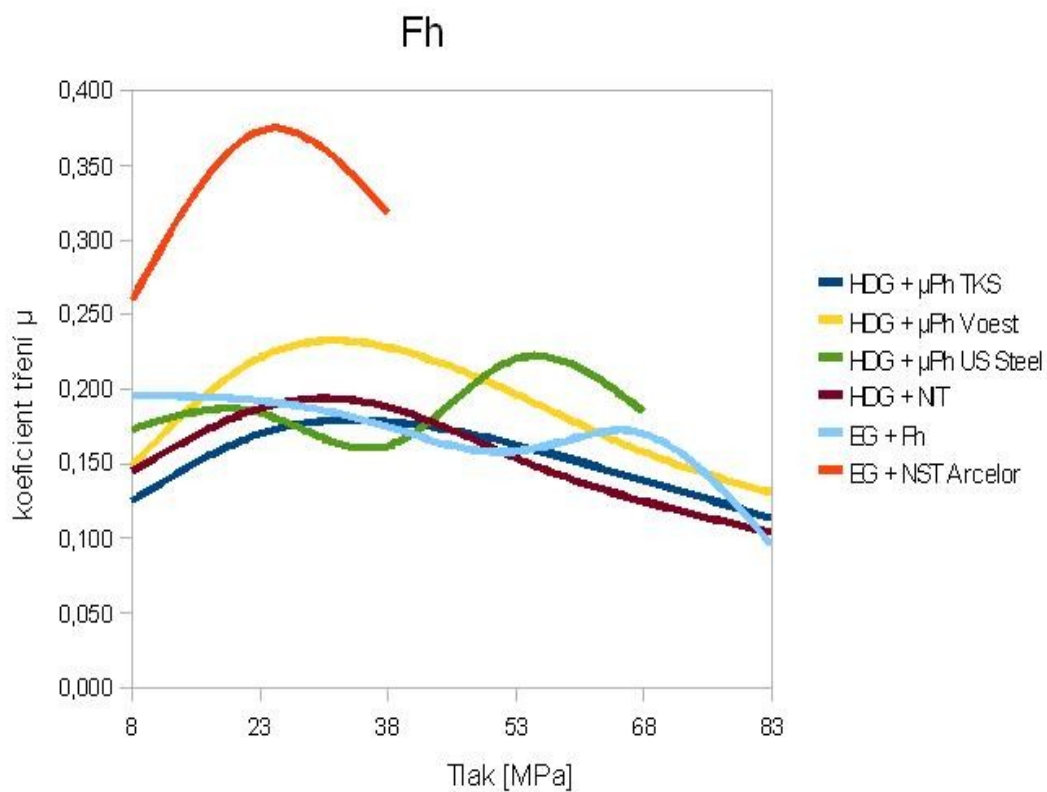
Obr. 4.2.1.5: Závislost koeficientu tření na tlaku EG+Ph



Obr. 4.2.1.6: Závislost koeficientu tření na tlaku EG+NST Arcelor



Obr. 4.2.1.7: Závislost koeficientu tření na tlaku, souhrnně výsledky pro Fs



Obr. 4.2.1.8: Závislost koeficientu tření na tlaku, souhrnně výsledky pro Fh

#### 4.2.2. Výsledné hodnoty drsností a jejich grafické porovnání u testovaných substrátů

Tab. 4.2.1: Průměrné hodnoty Ra a RPc pro měřené vzorky

Vzorek	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	RPc [1/cm]
HDG + $\mu\text{Ph}$ TKS	1,18 / 1,20	96 / 100
HDG + $\mu\text{Ph}$ Voest	1,15 / 1,15	65 / 62
HDG + $\mu\text{Ph}$ US Steel	1,10 / 1,13	133 / 123
HDG + NIT	1,40 / 1,35	95 / 91
EG + Ph	1,57 / 1,43	84 / 78
EG + NST Arcelor	1,44 / 1,06	85 / 81

##### 4.2.2.1. Výsledné charakteristiky drsností povrchů v oblastech působení tlaků pro kalené čelisti

Tab. 4.2.2.1.1: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

HDG + $\mu\text{Ph}$ TKS						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,846	0,880	0,647	0,595	0,747	0,390
RPc [1/cm]	90	98	75	48	22	48
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	4,40	4,27	3,82	3,40	2,78	2,52

Tab. 4.2.2.1.2: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

HDG + $\mu\text{Ph}$ Voest						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,999	0,915	1,018	0,944	0,752	0,754
RPc [1/cm]	78	60	68	65	68	40
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	4,56	4,14	4,34	4,10	3,57	3,48

Tab. 4.2.2.1.3: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

HDG + $\mu\text{Ph}$ US Steel						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,732	0,634	0,558	0,474	0,334	0,328
RPc [1/cm]	100	88	65	62	10	5
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	4,48	4,10	3,89	3,61	3,00	2,99

Tab. 4.2.2.1.4: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

HDG + NIT						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [μm]	1,147	0,920	0,774	0,638	0,599	0,560
RPc [1/cm]	95	102	80	58	32	42
Rz [μm]	4,62	4,26	3,62	3,76	3,93	3,39

Tab. 4.2.2.1.5: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

EG + Ph						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [μm]	1,394	1,292	1,231	0,919	0,871	1,120
RPc [1/cm]	80	85	79	86	90	90
Rz [μm]	6,48	7,57	7,28	6,40	5,77	6,34

Tab. 4.2.2.1.6: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

EG + NST Arcelor						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [μm]	1,138	0,963	1,095	1,560	-	-
RPc [1/cm]	88	80	90	85	-	-
Rz [μm]	7,24	6,36	7,13	9,71	-	-

#### 4.2.2.2. Výsledné charakteristiky drsností povrchů v oblastech působení tlaků pro nekalené čelisti

Tab. 4.2.2.2.1: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

HDG + μPh TKS						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [μm]	0,846	0,873	0,831	0,685	0,647	0,483
RPc [1/cm]	92	88	85	65	65	32
Rz [μm]	4,28	4,55	4,52	4,11	3,99	2,50

Tab. 4.2.2.2.2: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

HDG + $\mu$ Ph Voest						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [ $\mu$ m]	1,139	0,991	0,698	0,703	0,725	0,846
RPc [1/cm]	75	55	52	42	50	59
Rz [ $\mu$ m]	4,48	4,87	4,21	4,28	3,98	3,69

Tab. 4.2.2.2.3: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

HDG + $\mu$ Ph US Steel						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [ $\mu$ m]	1,566	1,490	1,952	1,240	-	-
RPc [1/cm]	100	105	82	90	-	-
Rz [ $\mu$ m]	9,13	9,91	11,50	8,45	-	-

Tab.4.2.2.2.4: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

HDG + NIT						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [ $\mu$ m]	0,984	0,833	0,782	0,719	0,771	0,680
RPc [1/cm]	100	65	52	65	75	48
Rz [ $\mu$ m]	4,17	4,25	4,21	3,88	3,92	3,71

Tab. 4.2.2.2.5: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

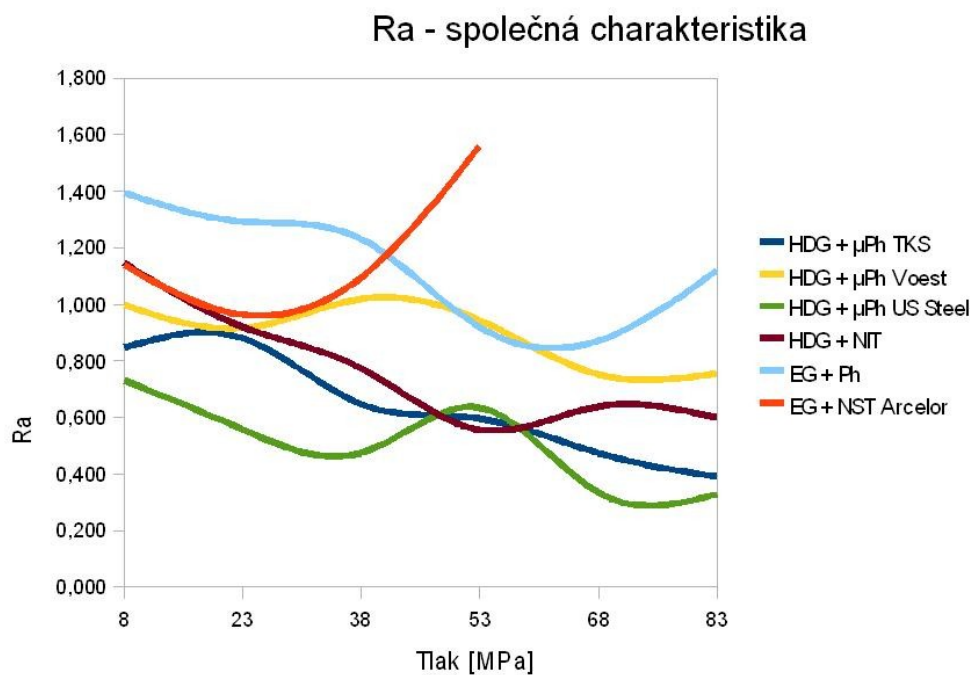
EG + Ph - NK						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [ $\mu$ m]	1,371	1,237	1,185	1,461	1,245	1,080
RPc [1/cm]	92	88	92	82	85	78
Rz [ $\mu$ m]	7,07	7,58	7,23	8,43	6,52	6,03



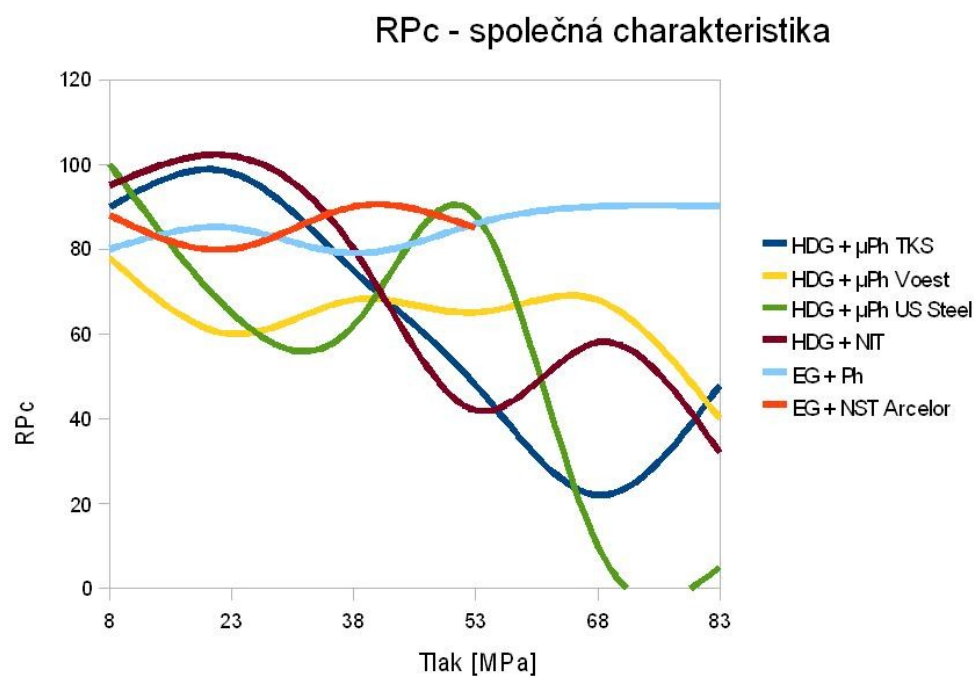
Tab. 4.2.2.2.6: Hodnoty drsností povrchů Ra, RPc, Rz v oblastech působení tlaků

EG + NST Arcelor - NK						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,967	4,299	6,147	-	-	-
RPc [1/cm]	98	62	42	-	-	-
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	11,30	21,50	31,50	-	-	-

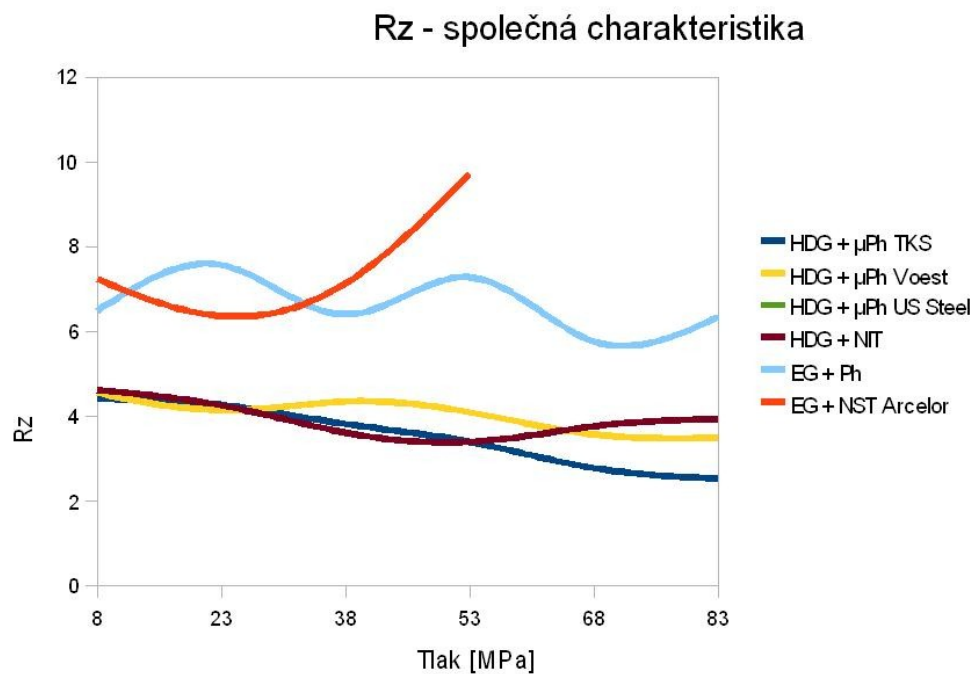
#### 4.2.2.3. Společné grafické znázornění hodnot drsnosti za použití kalených čelistí



Obr. 4.2.2.3.1: Společná charakteristika závislosti drsnosti Ra na tlaku

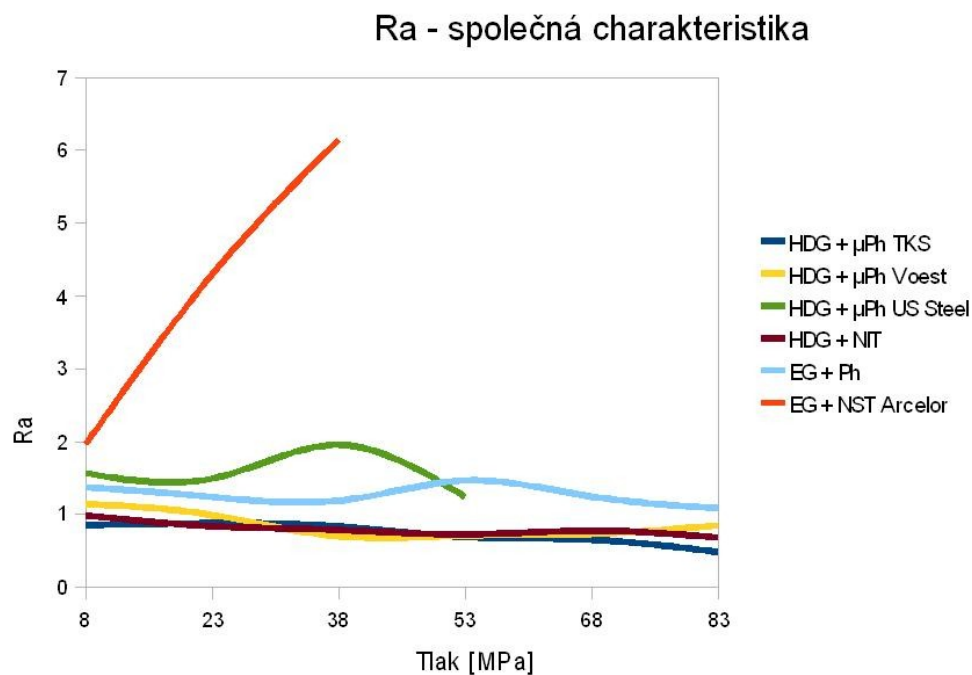


Obr. 4.2.2.3.2: Společná charakteristika závislosti drsnosti RPc na tlaku

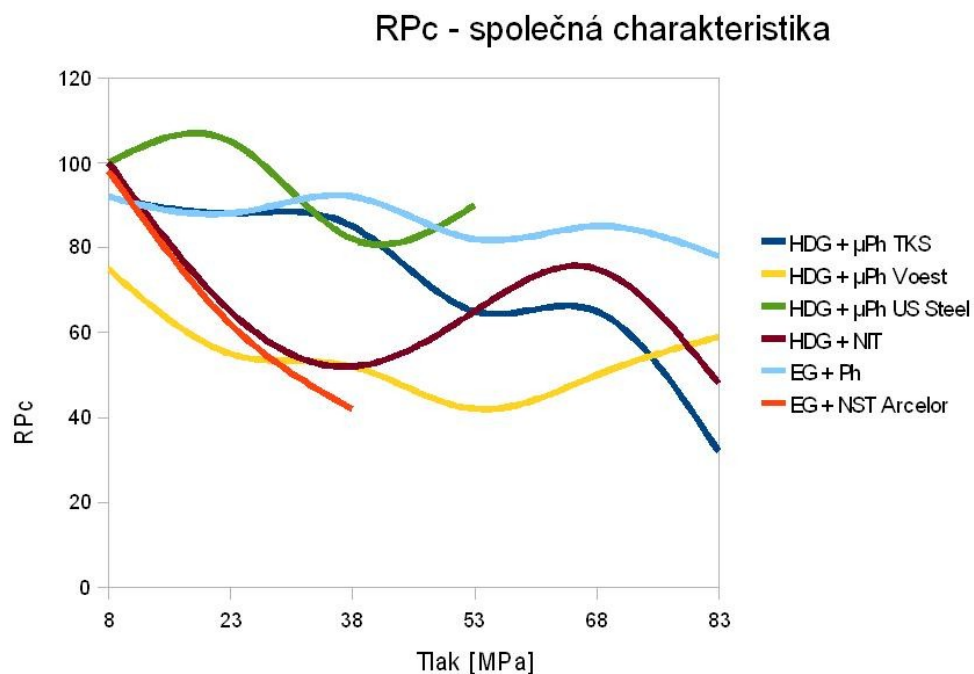


Obr. 4.2.2.3.3: Společná charakteristika závislosti drsnosti Rz na tlaku

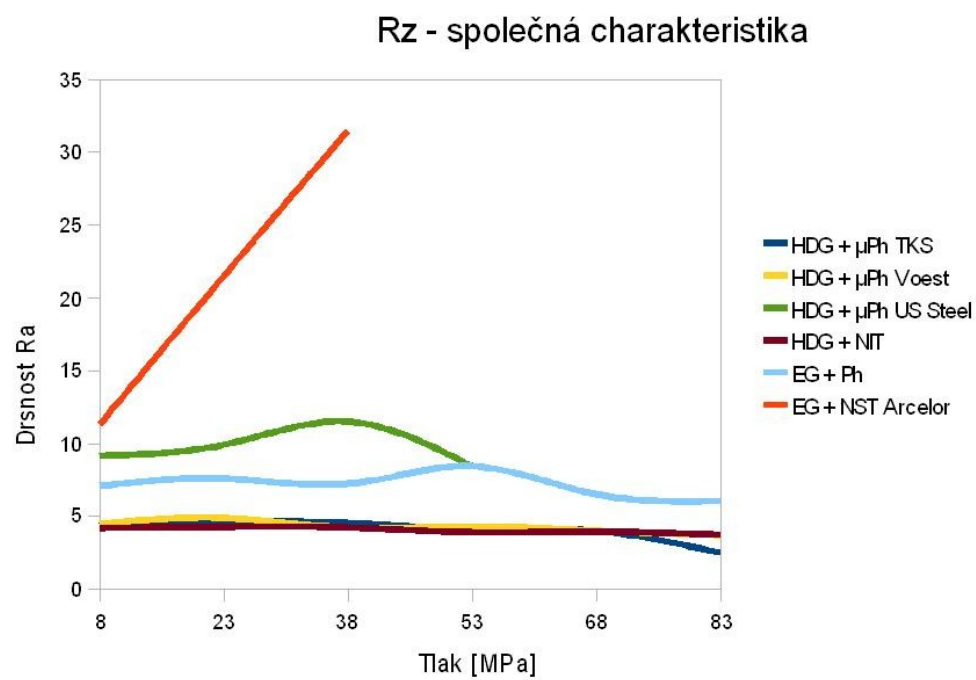
#### 4.2.2.4. Společné grafické znázornění hodnot drsnosti za použití nekalených čelistí



Obr. 4.2.2.4.1: Společná charakteristika závislosti drsnosti Ra na tlaku

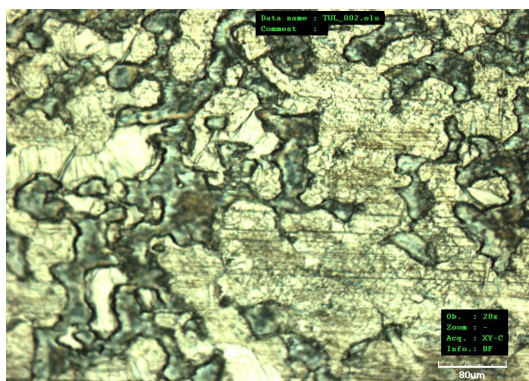


Obr. 4.2.2.4.2: Společná charakteristika závislosti drsnosti RPc na tlaku

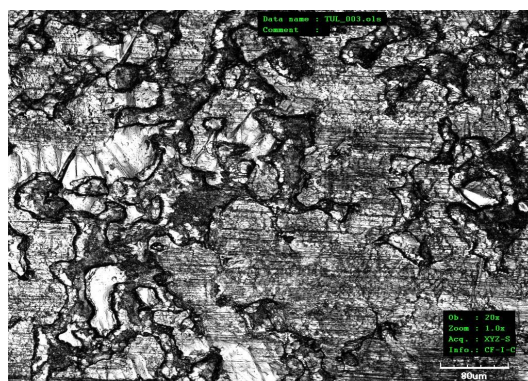


Obr. 4.2.2.4.2: Společná charakteristika závislosti drsnosti Rz na tlaku

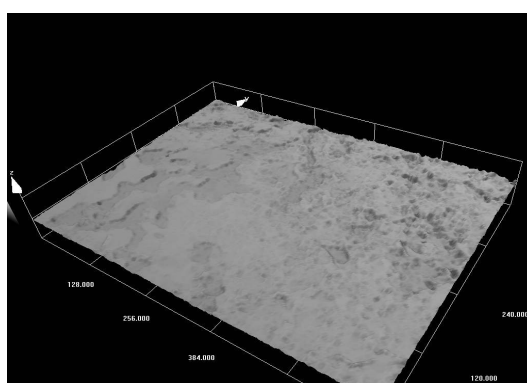
### 4.3. Snímky povrchů jednotlivých substrátů pro kalené čelisti



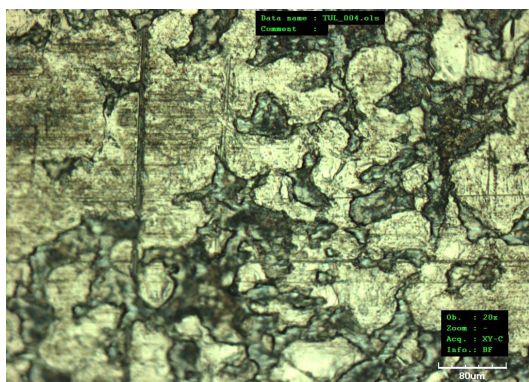
Obr. 4.3.1: HDG + μPh TKS\_8MPa



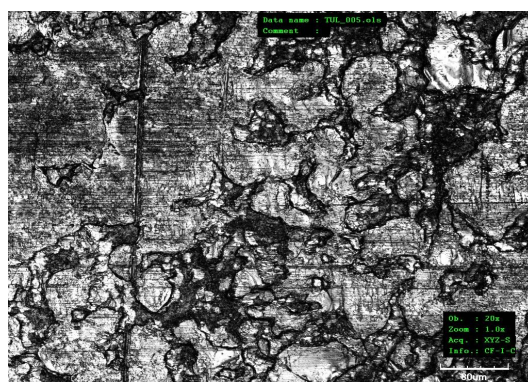
Obr. 4.3.2: HDG + μPh TKS\_8MPa



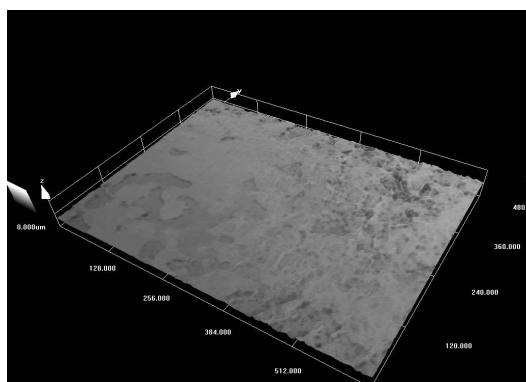
Obr. 4.3.3: HDG + μPh TKS\_8MPa



Obr. 4.3.4: HDG + μPh TKS\_23MPa

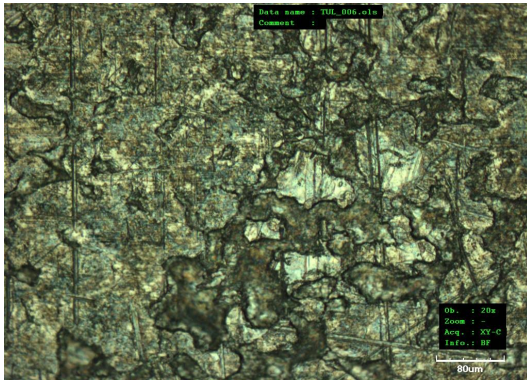


Obr. 4.3.5: HDG + μPh TKS\_23MPa

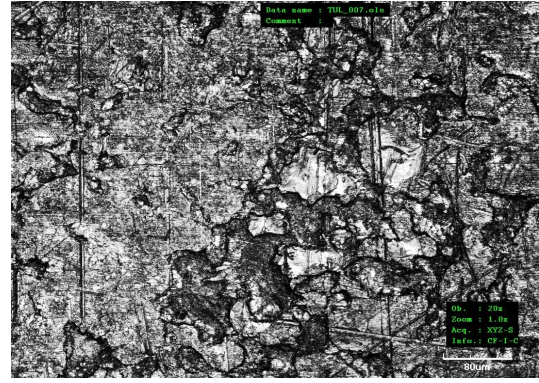


Obr. 4.3.6: HDG + μPh TKS\_23MPa

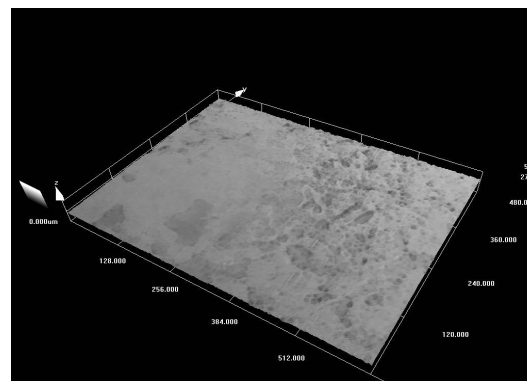




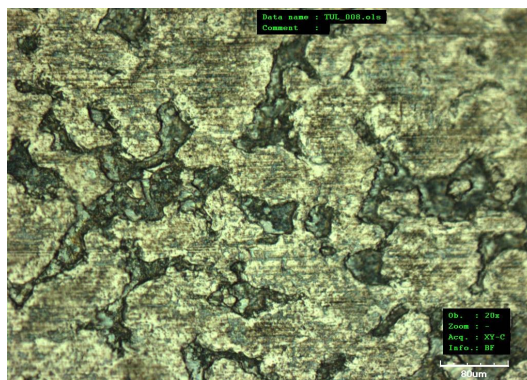
Obr. 4.3.7: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_38MPa



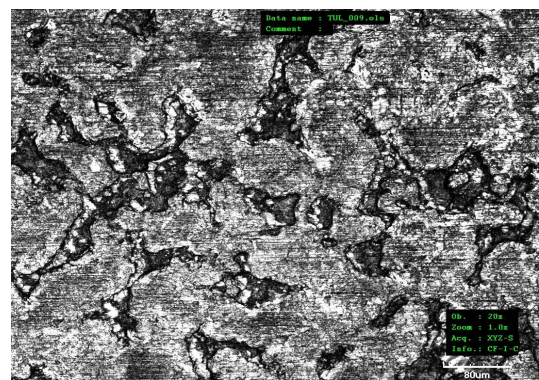
Obr. 4.3.8: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_38MPa



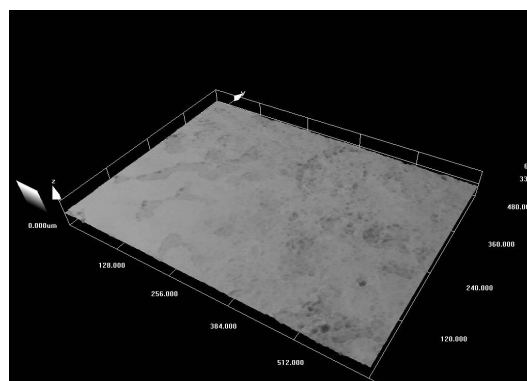
Obr. 4.3.9: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_38MPa



Obr. 4.3.10: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_53MPa

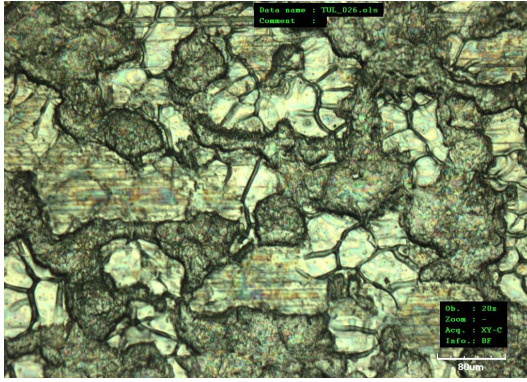


Obr. 4.3.11: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_53MPa

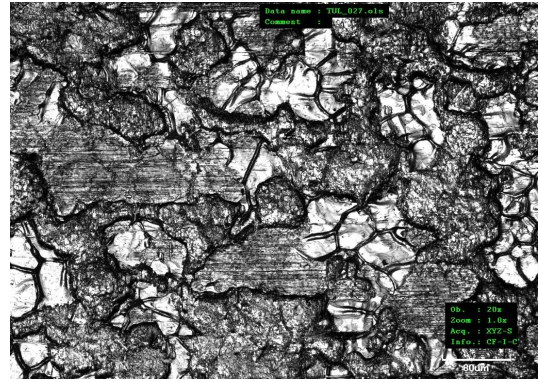


Obr. 4.3.12: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_53MPa

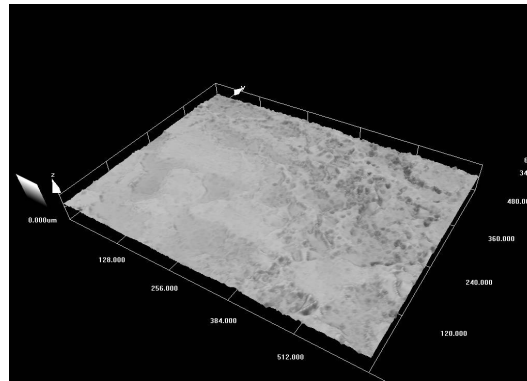




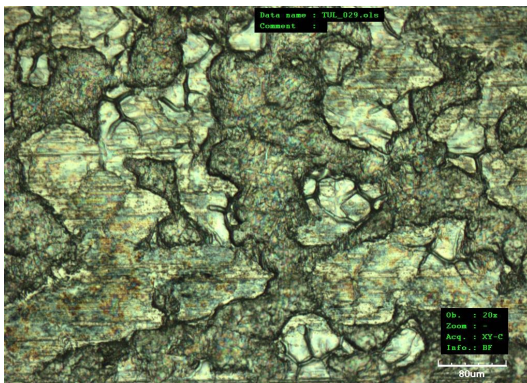
Obr. 4.3.13: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_8MPa



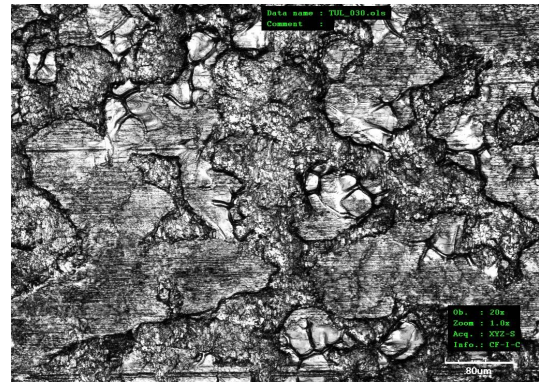
Obr. 4.3.14: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_8MPa



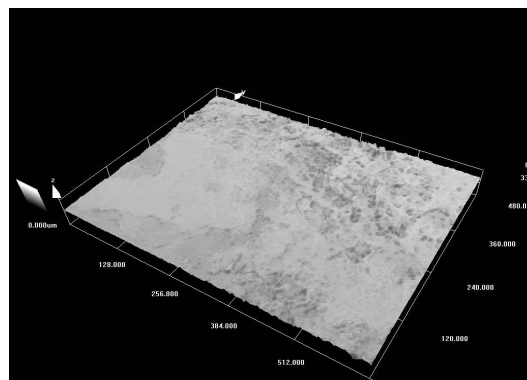
Obr. 4.3.15: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_8MPa



Obr. 4.3.16: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_23MPa

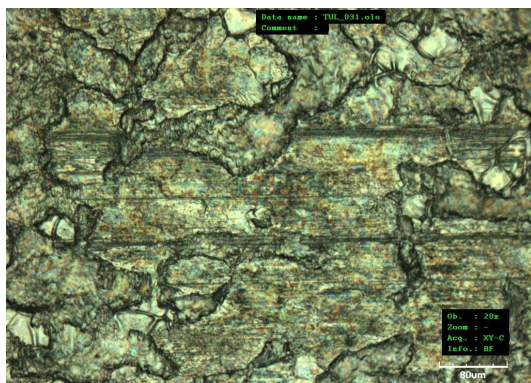


Obr. 4.3.17: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_23MPa

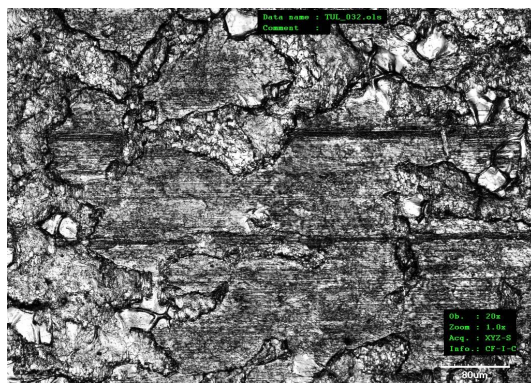


Obr. 4.3.18: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_23MPa

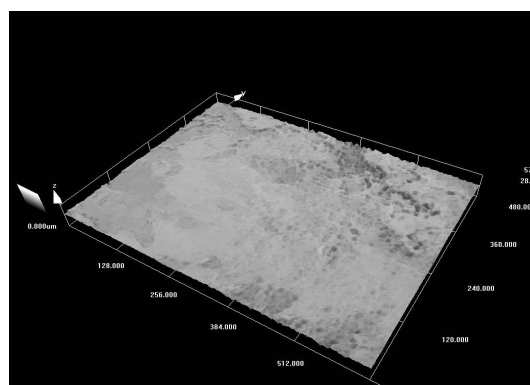




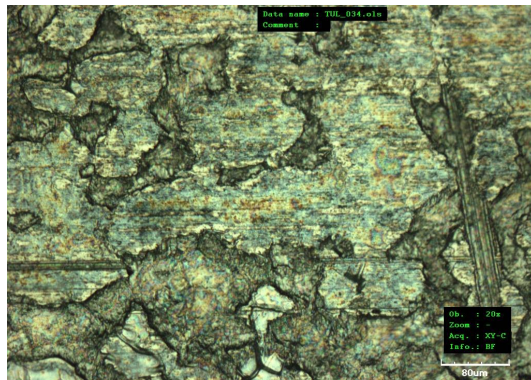
Obr. 4.3.19: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_38MPa



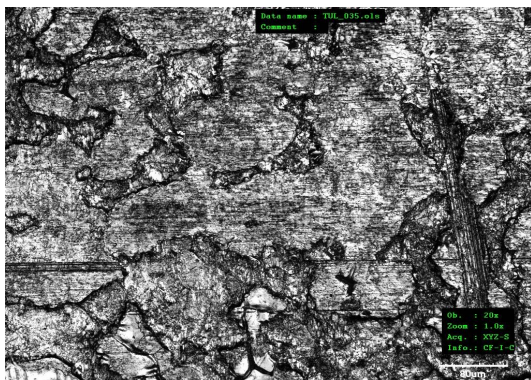
Obr. 4.3.20: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_38MPa



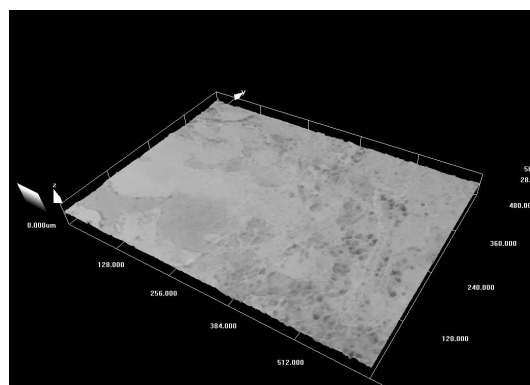
Obr. 4.3.21: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_38MPa



Obr. 4.3.22: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_53MPa

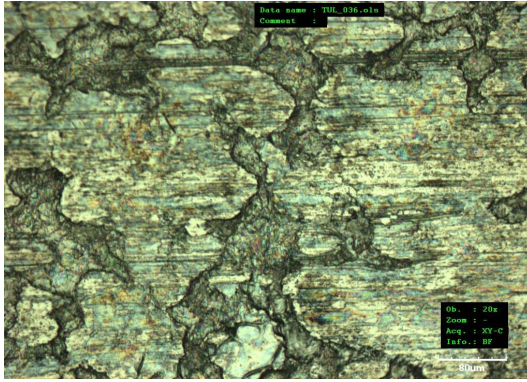


Obr. 4.3.23: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_53MPa

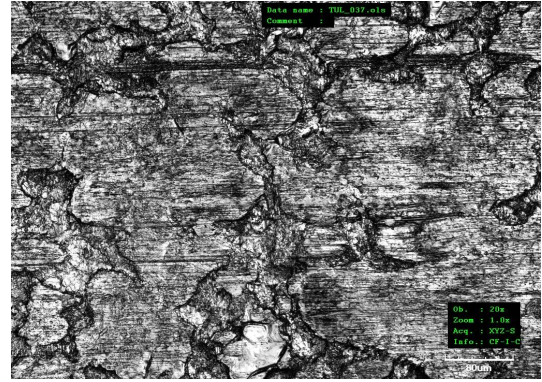


Obr. 4.3.24: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_53MPa

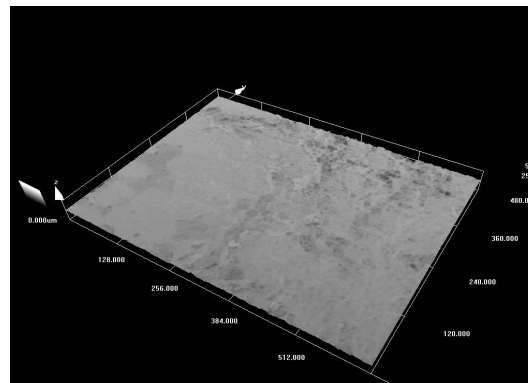




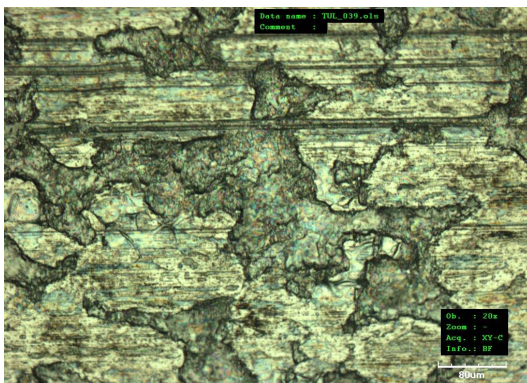
Obr. 4.3.25: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_68MPa



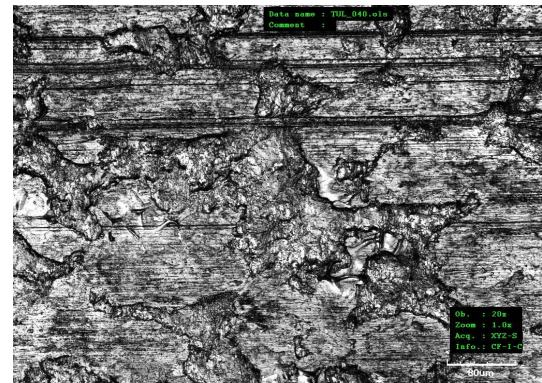
Obr. 4.3.26: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_68MPa



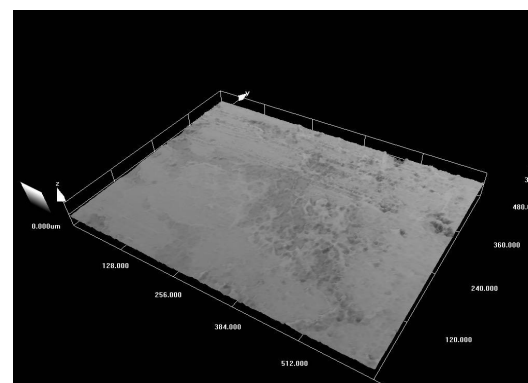
Obr. 4.3.27: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_68MPa



Obr. 4.3.28: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_83MPa

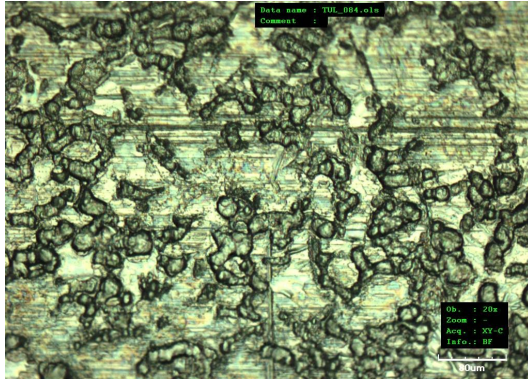


Obr. 4.3.29: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_83MPa

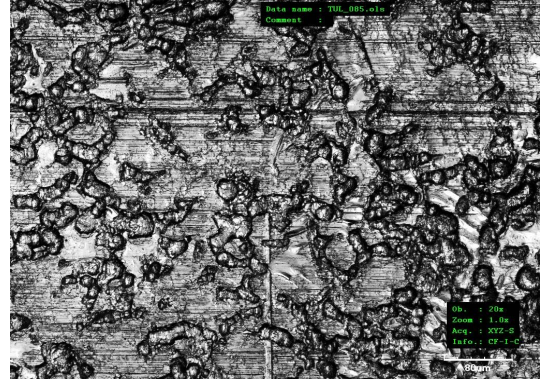


Obr. 4.3.30: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_83MPa

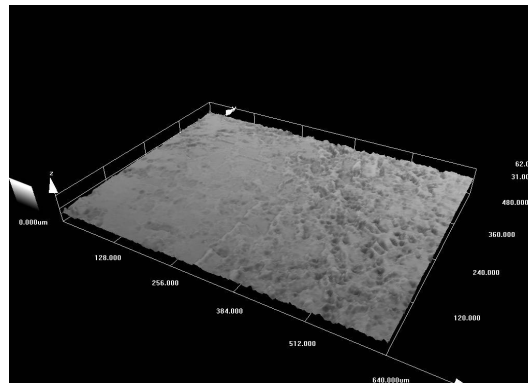




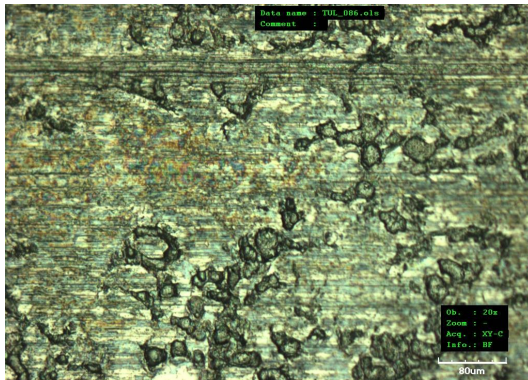
Obr. 4.3.31: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_8MPa



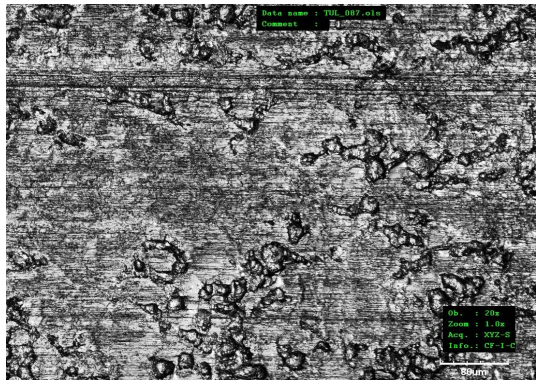
Obr. 4.3.32: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_8MPa



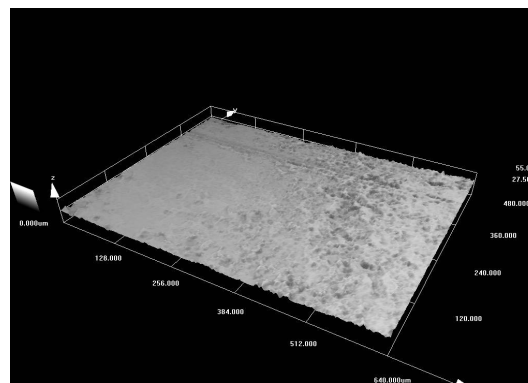
Obr. 4.3.33: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_8MPa



Obr. 4.3.34: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_23MPa

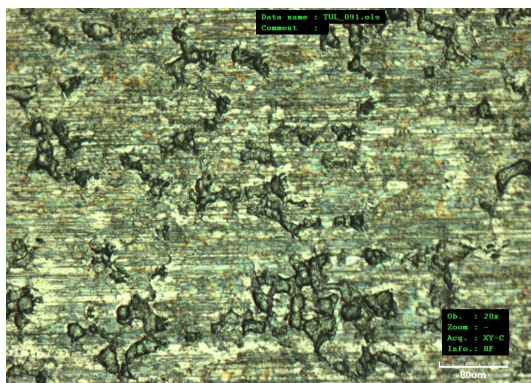


Obr. 4.3.35: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_23MPa

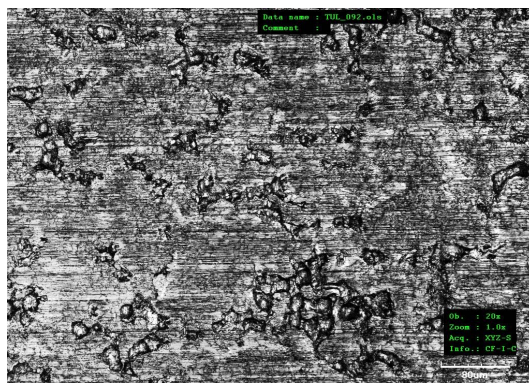


Obr. 4.3.36: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_23MPa

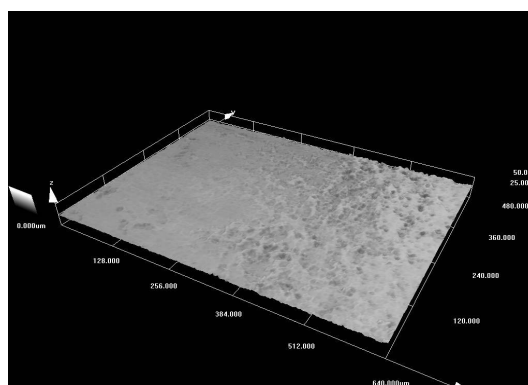




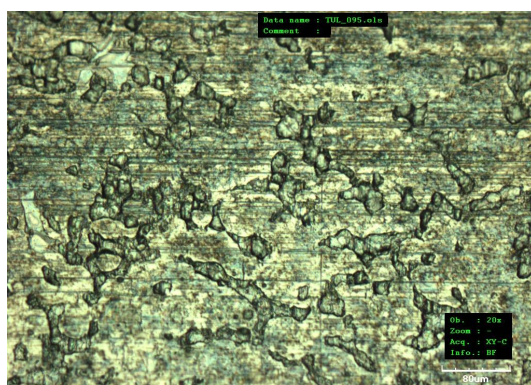
Obr. 4.3.37: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_38MPa



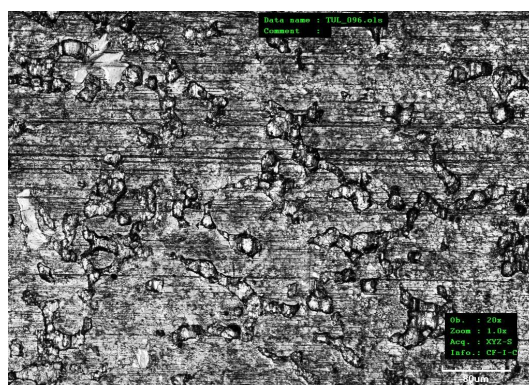
Obr. 4.3.38 HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_38MPa



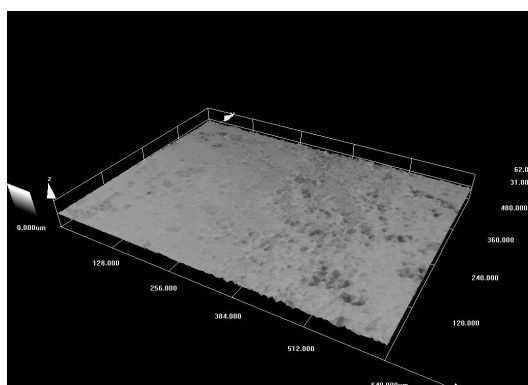
Obr. 4.3.39: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_38MPa



Obr. 4.3.40: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_53MPa

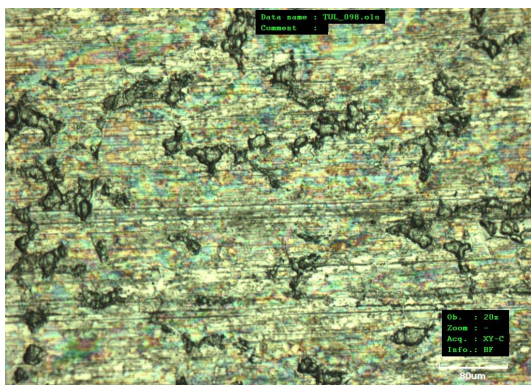


Obr. 4.3.41: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_53MPa

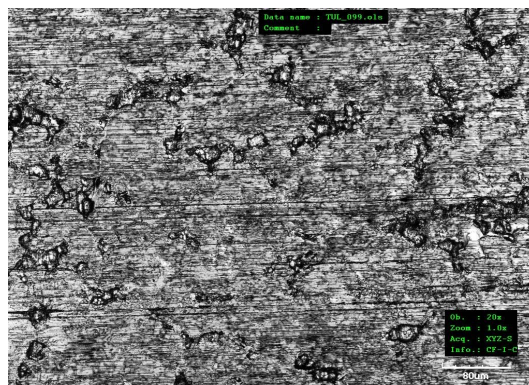


Obr. 4.3.42: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_53MPa

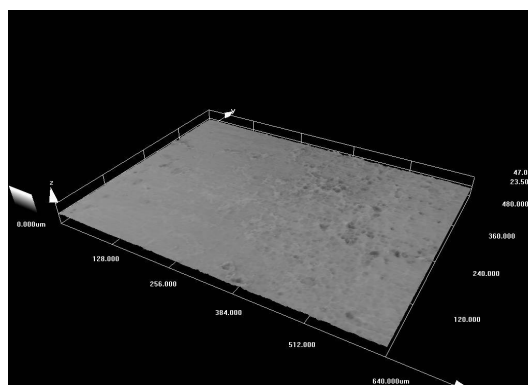




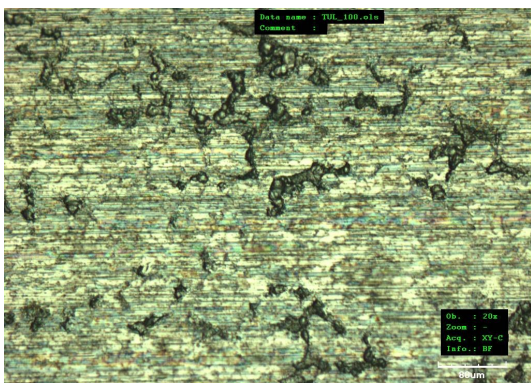
Obr. 4.3.43: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_68MPa



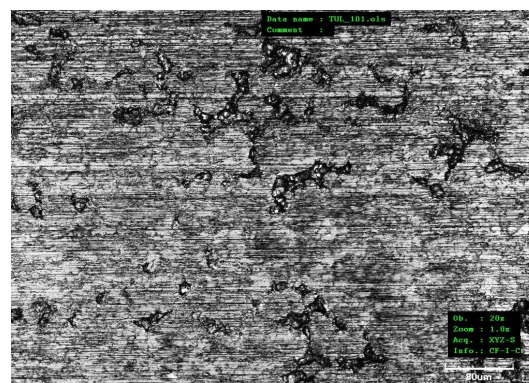
Obr. 4.3.44: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_68MPa



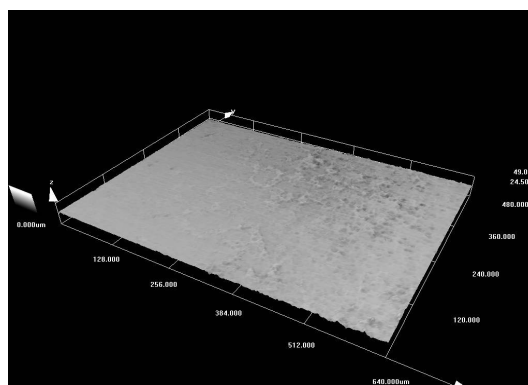
Obr.4.3.45: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_68MPa



Obr. 4.3.46 HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_83MPa

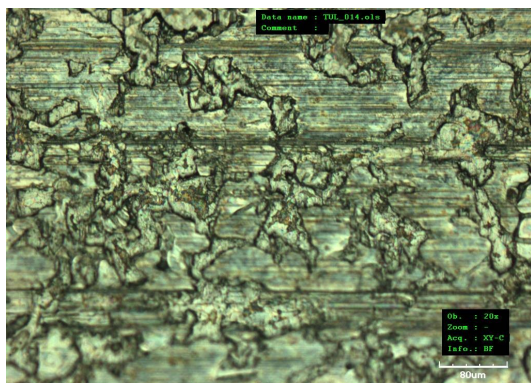


Obr. 4.3.47: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_83MPa

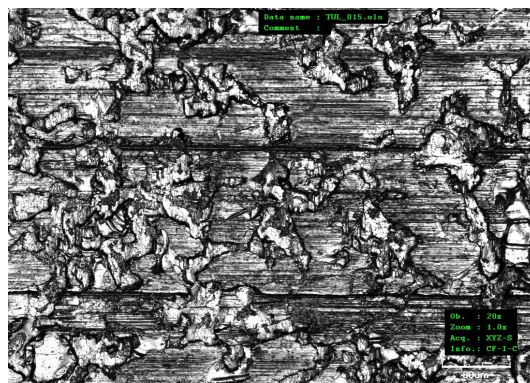


Obr. 4.3.48: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_83MPa

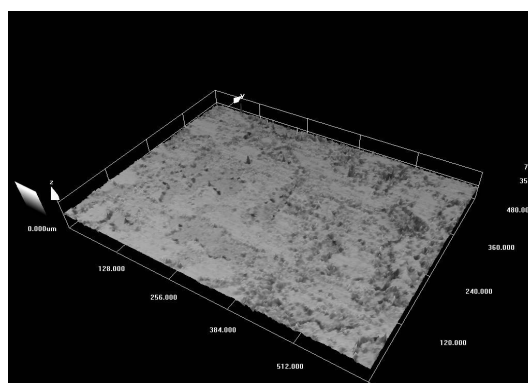




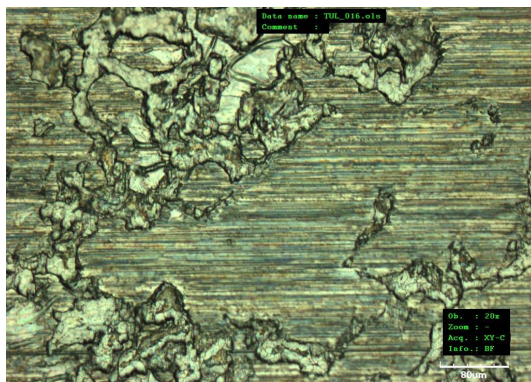
Obr. 4.3.49 HDG + NIT\_8MPa



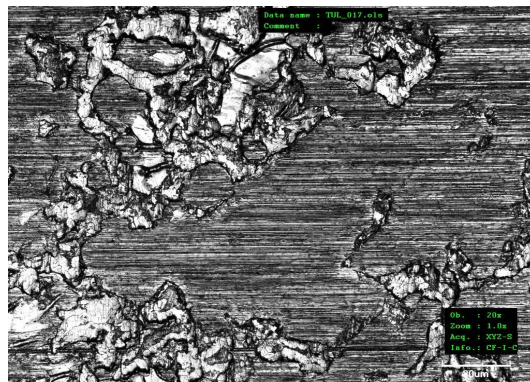
Obr. 4.3.50: HDG + NIT\_8MPa



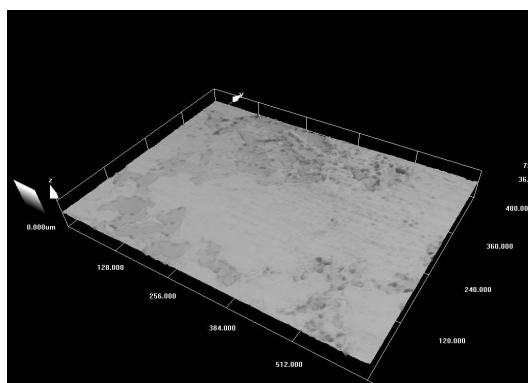
Obr. 4.3.51: HDG + NIT\_8MPa



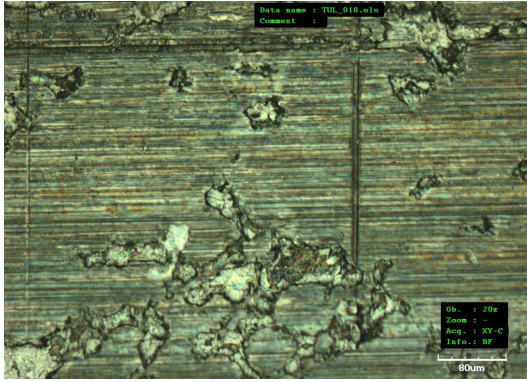
Obr. 4.3.52 HDG + NIT\_23MPa



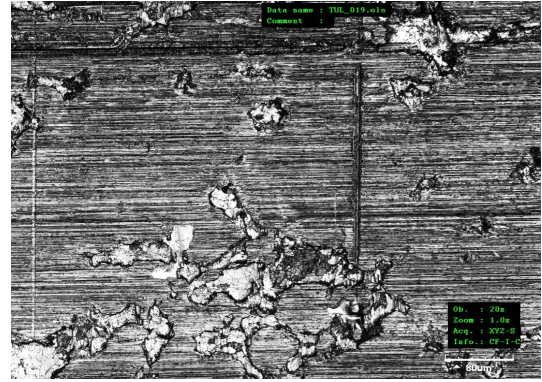
Obr. 4.3.53: HDG + NIT\_23MPa



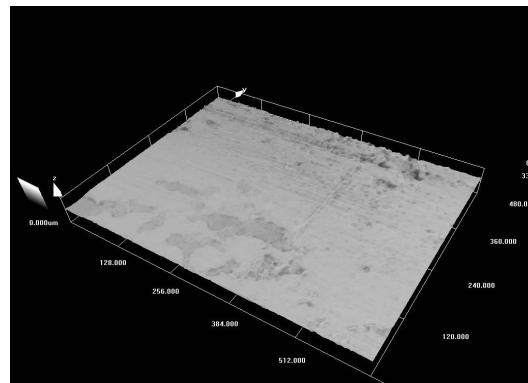
Obr. 4.3.54: HDG + NIT\_23MPa



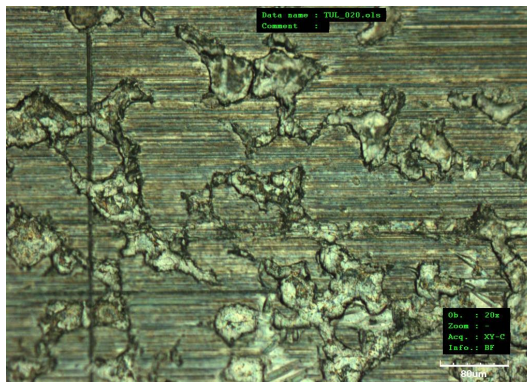
Obr. 4.3.55: HDG + NIT\_38MPa



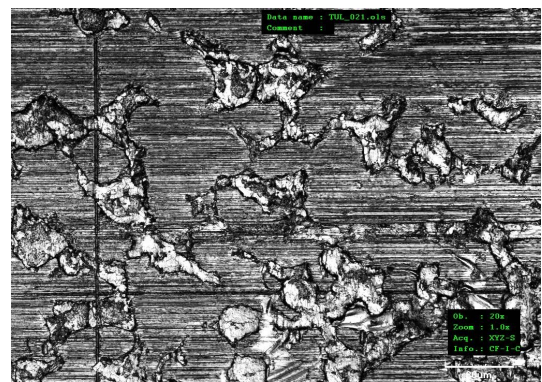
Obr. 4.3.56: HDG + NIT\_38MPa



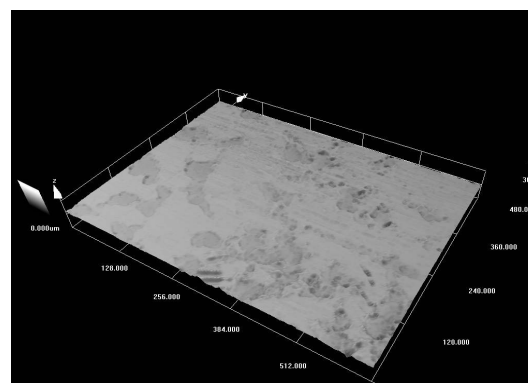
Obr. 4.3.57: HDG + NIT\_38MPa



Obr. 4.3.58: HDG + NIT\_53MPa

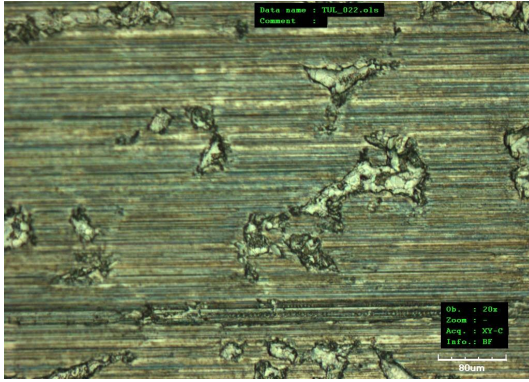


Obr. 4.3.59: HDG + NIT\_53MPa

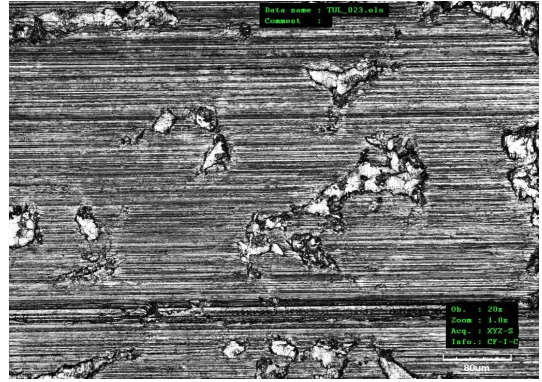


Obr. 4.3.60: HDG + NIT\_53MPa

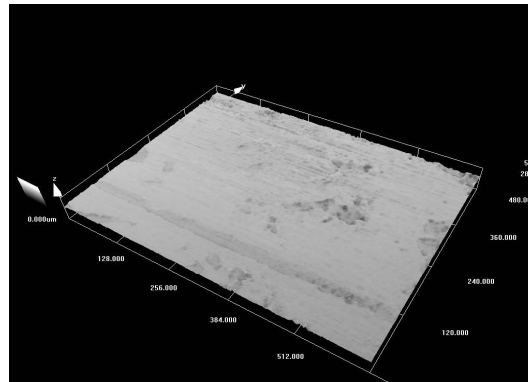




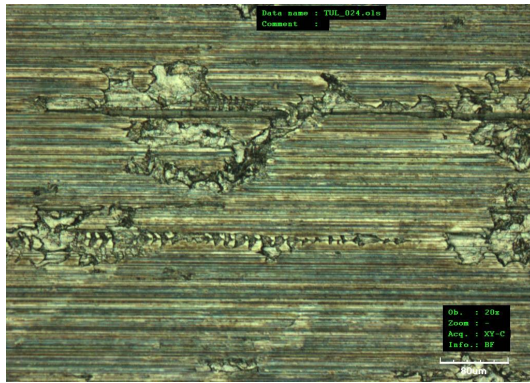
Obr. 4.3.61: HDG + NIT\_68MPa



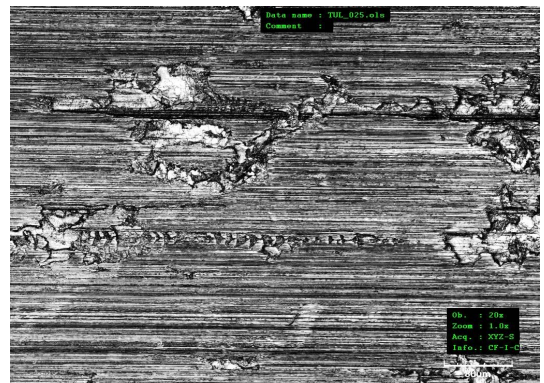
Obr. 4.3.62: HDG + NIT\_68MPa



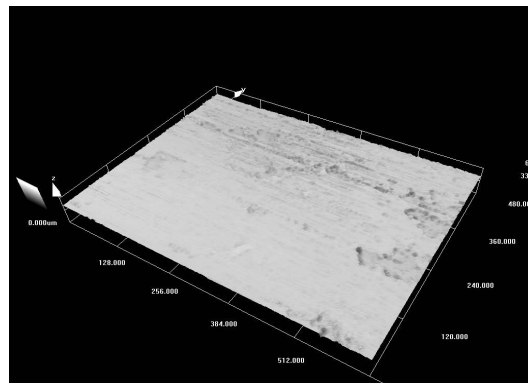
Obr. 4.3.63: HDG + NIT\_68MPa



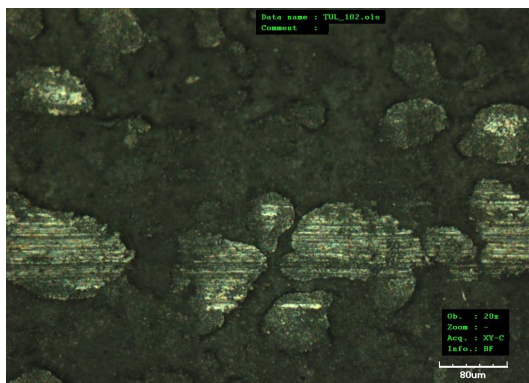
Obr. 4.3.64: HDG + NIT\_83MPa



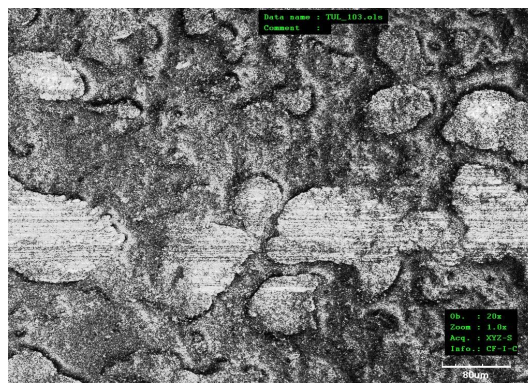
Obr. 4.3.65: HDG + NIT\_83MPa



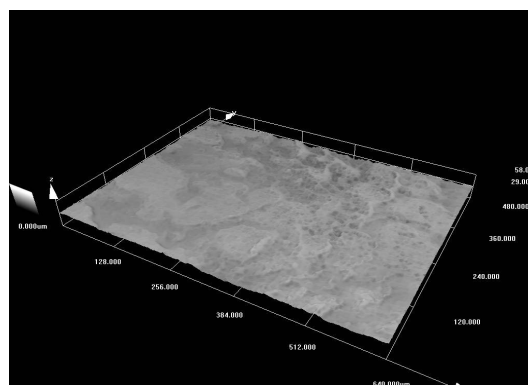
Obr. 4.3.66: HDG + NIT\_83MPa



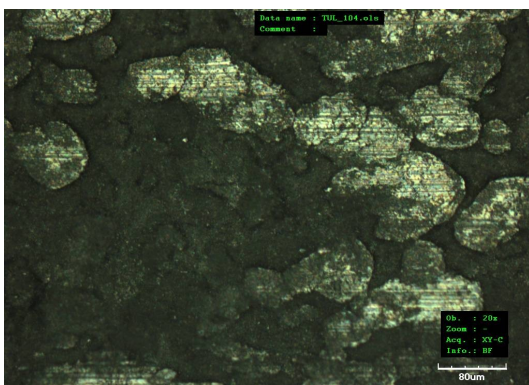
Obr. 4.3.67: EG + Ph\_8MPa



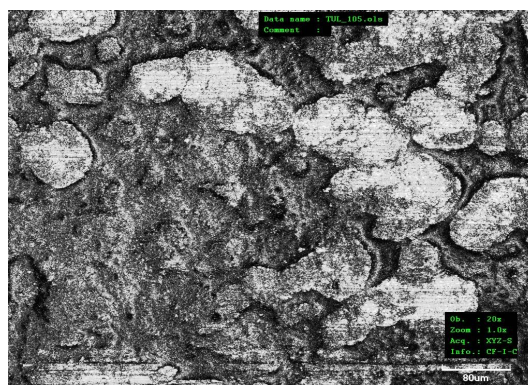
Obr. 4.3.68: EG + Ph\_8MPa



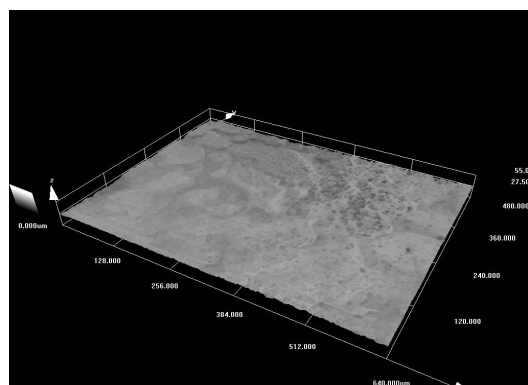
Obr. 4.3.69: EG + Ph\_8MPa



Obr. 4.3.70: EG + Ph\_23MPa

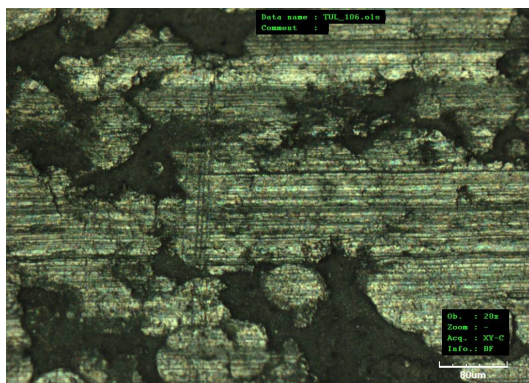


Obr. 4.3.71: EG + Ph\_23MPa

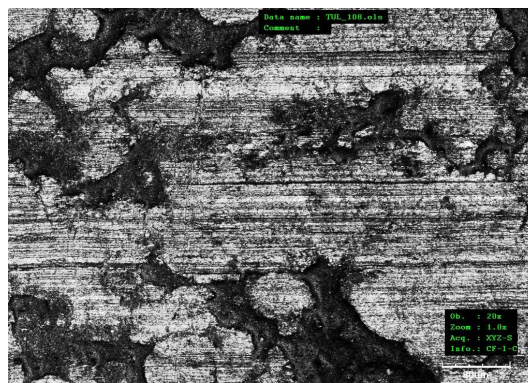


Obr. 4.3.72: EG + Ph\_23MPa

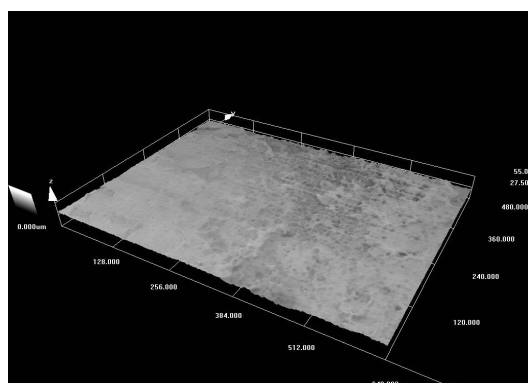




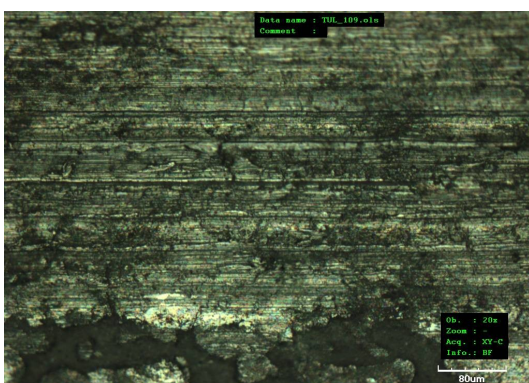
Obr. 4.3.73: EG + Ph\_38MPa



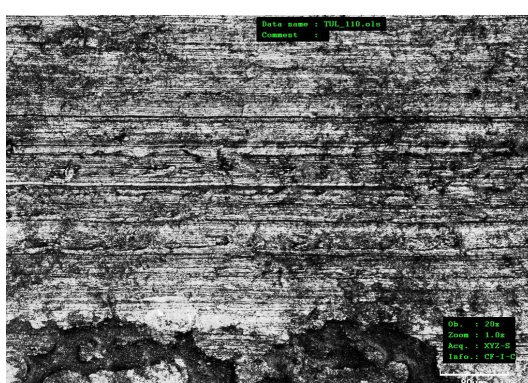
Obr. 4.3.74: EG + Ph\_38MPa



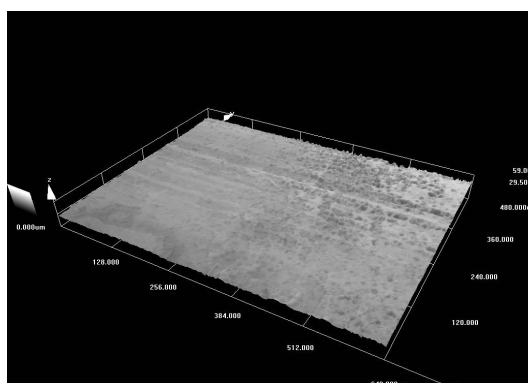
Obr. 4.3.75: EG + Ph\_38MPa



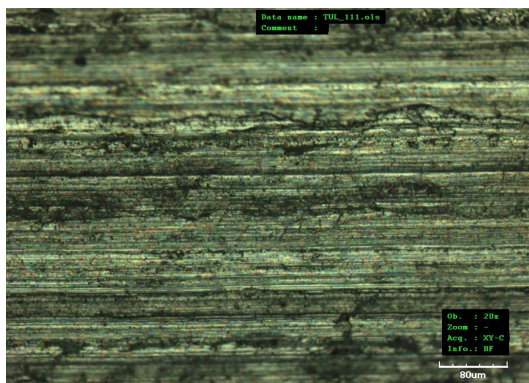
Obr. 4.3.76: EG + Ph\_53MPa



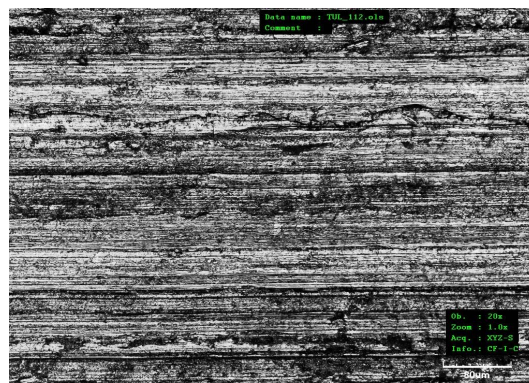
Obr. 4.3.77: EG + Ph\_53MPa



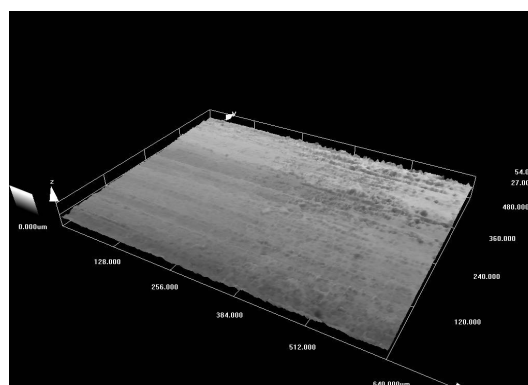
Obr. 4.3.78: EG + Ph\_53MPa



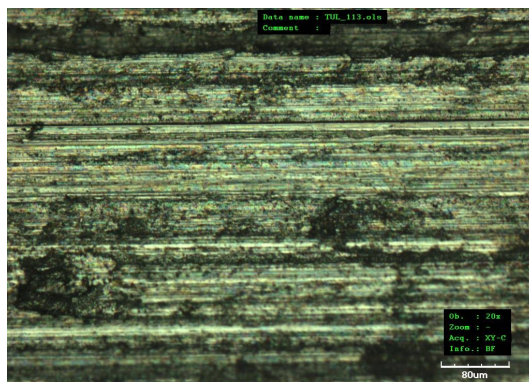
Obr. 4.3.79: EG + Ph\_68MPa



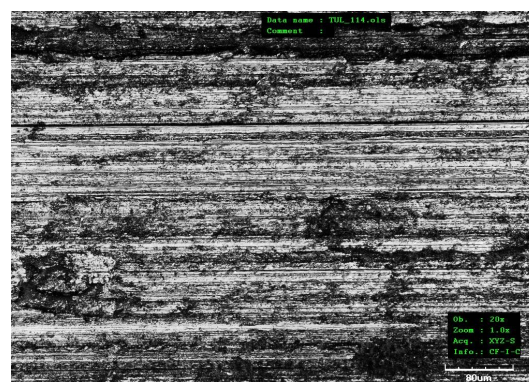
Obr. 4.3.80: EG + Ph\_68MPa



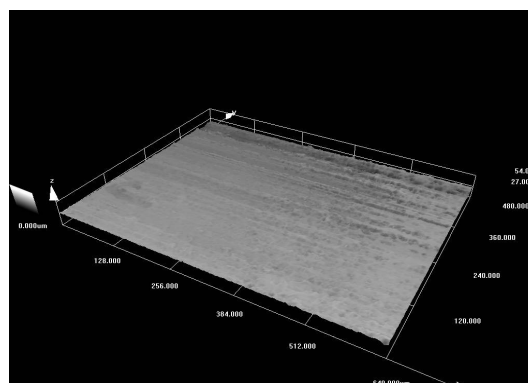
Obr. 4.3.81: EG + Ph\_68MPa



Obr. 4.3.82: EG + Ph\_83MPa

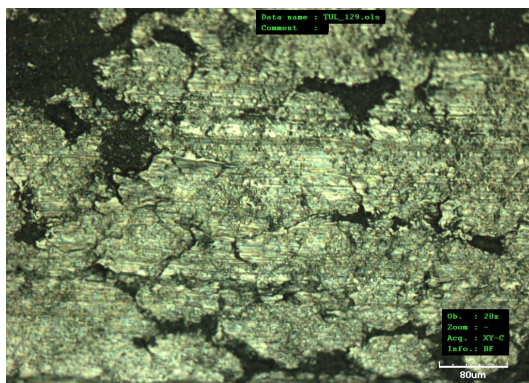


Obr. 4.3.83: EG + Ph\_83MPa

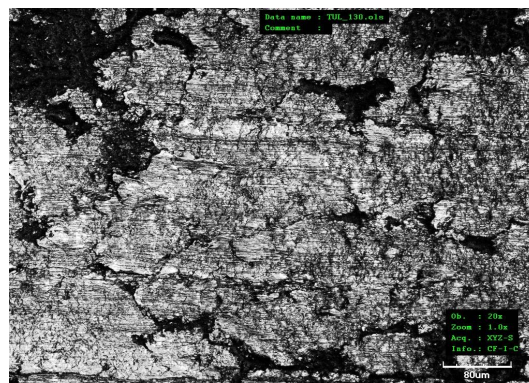


Obr. 4.3.84: EG + Ph\_83MPa

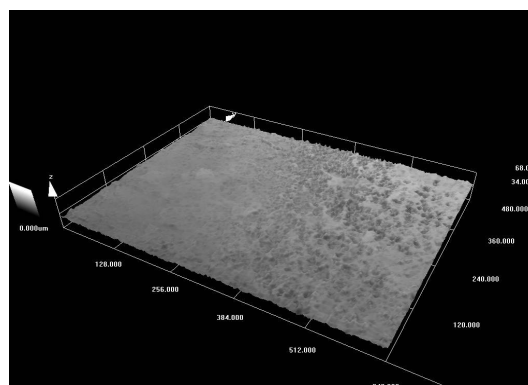




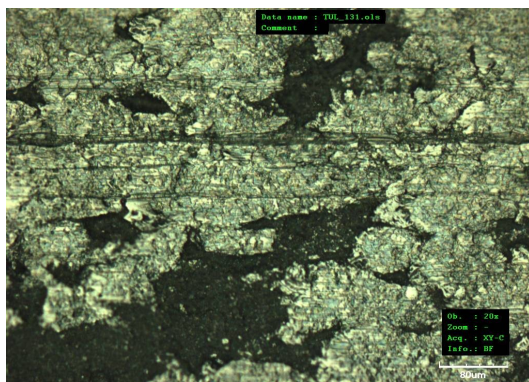
Obr. 4.3.85: EG + NST Arcelor\_8MPa



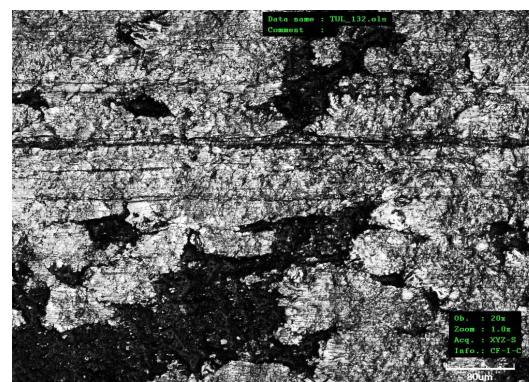
Obr. 4.3.86: EG + NST Arcelor\_8MPa



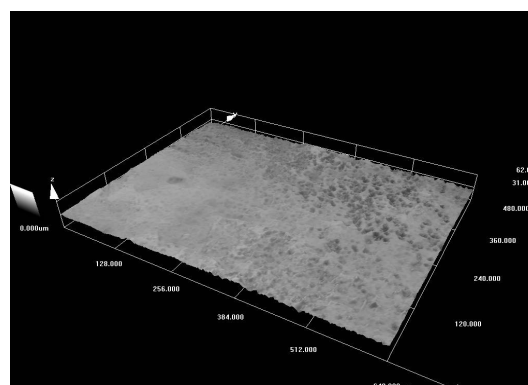
Obr. 4.3.87: EG + NST Arcelor\_8MPa



Obr. 4.3.88: EG + NST Arcelor\_23MPa



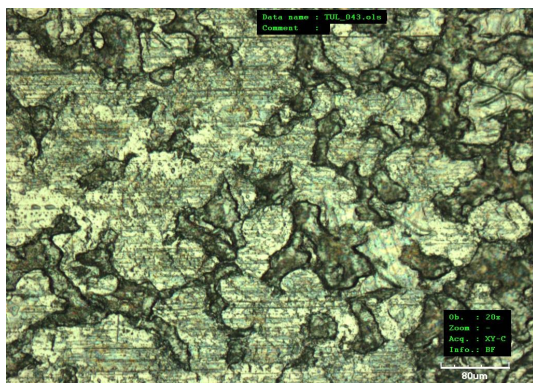
Obr. 4.3.89: EG + NST Arcelor\_23MPa



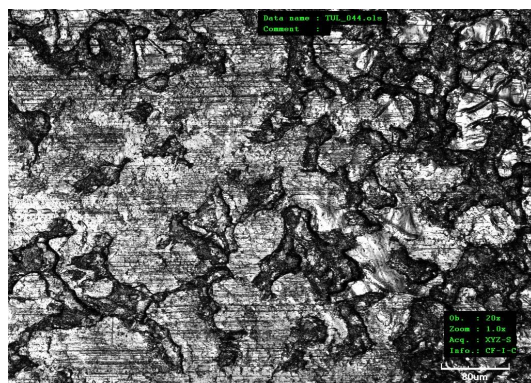
Obr. 4.3.90: EG + NST Arcelor\_23MPa



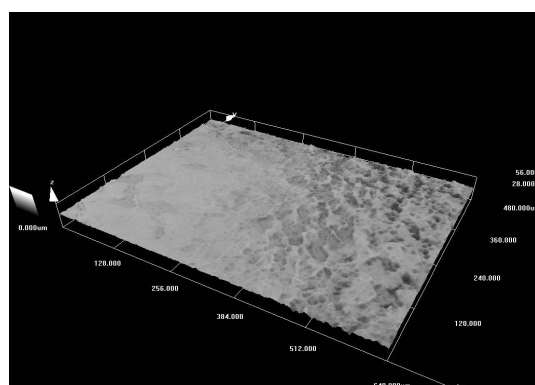
#### 4.4. Snímky povrchů jednotlivých substrátů pro nekalené čelisti



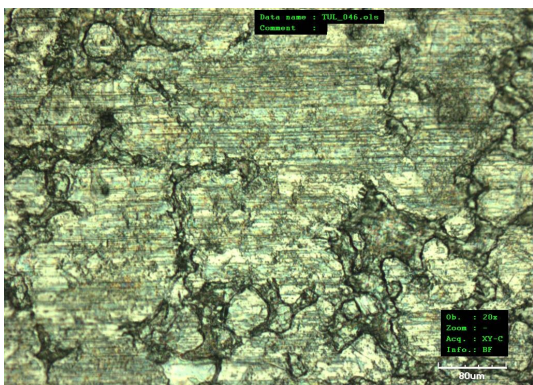
Obr. 4.4.1: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_8MPa



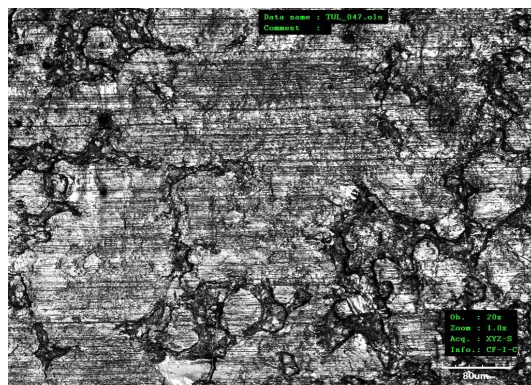
Obr. 4.4.2: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_8MPa



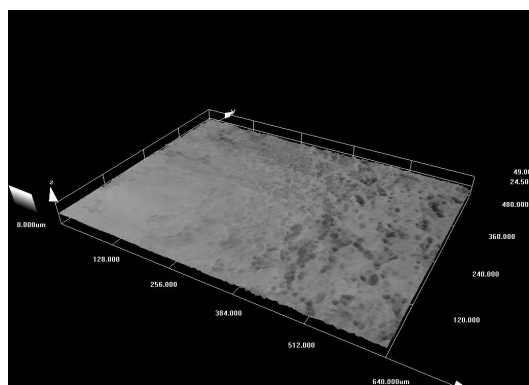
Obr. 4.4.3: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_8MPa



Obr. 4.4.4: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_23MPa

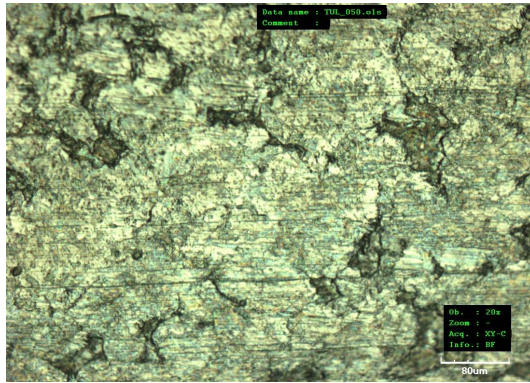


Obr. 4.4.5: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_23MPa

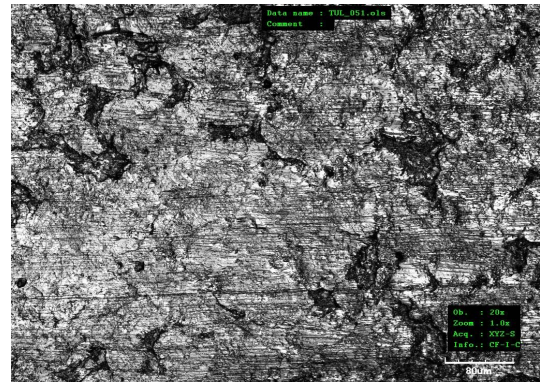


4.4.6: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_23MPa

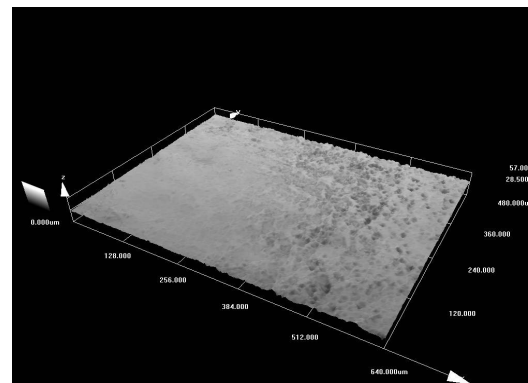




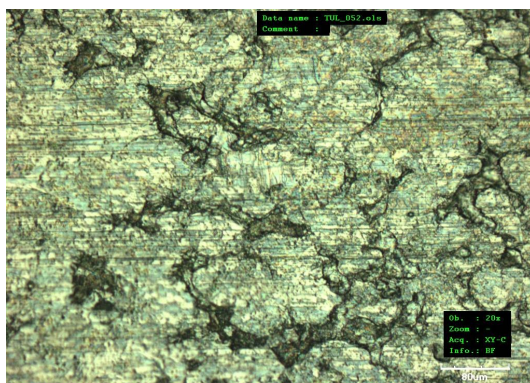
Obr. 4.4.7: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_38MPa



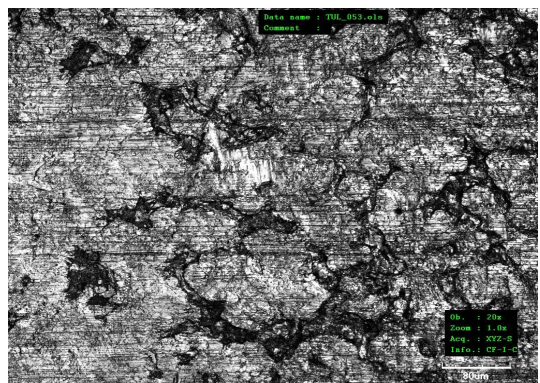
Obr. 4.4.8: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_38MPa



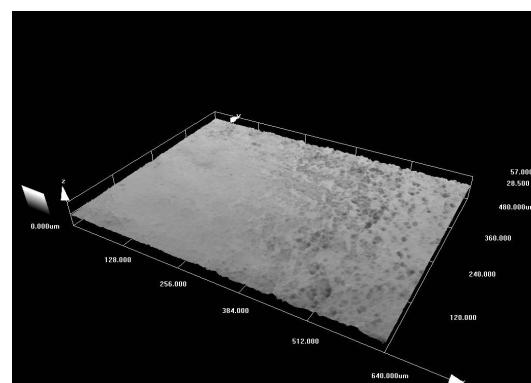
Obr. 4.4.9: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_38MPa



Obr. 4.4.10: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_53MPa

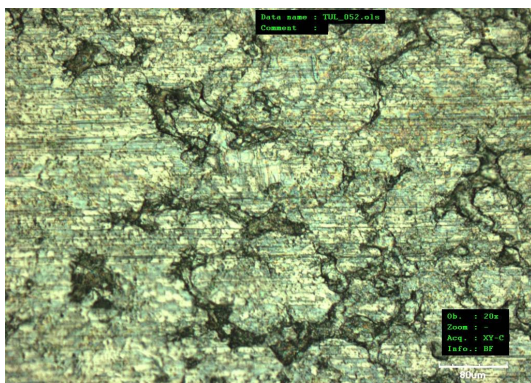


Obr. 4.4.11: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_53MPa

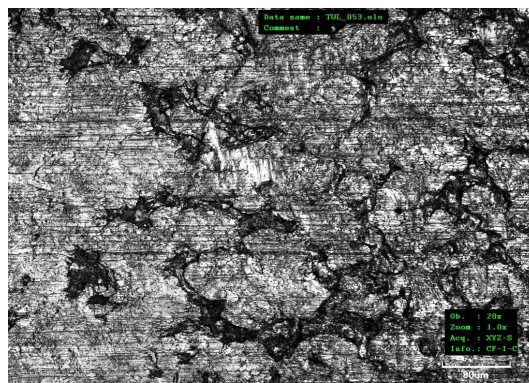


Obr. 4.4.12: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_53MPa

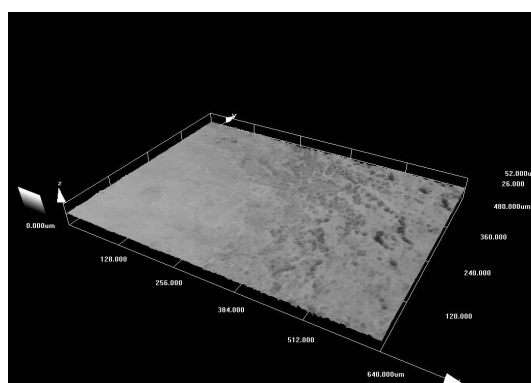




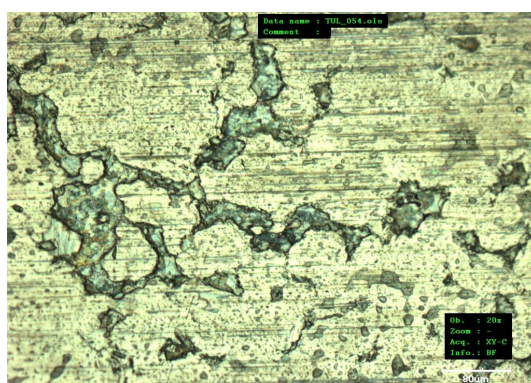
Obr. 4.4.13: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_68MPa



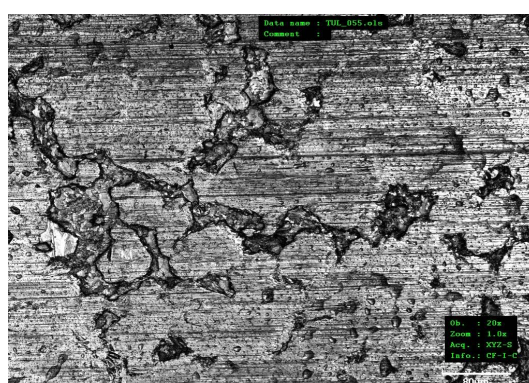
Obr. 4.4.14: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_68MPa



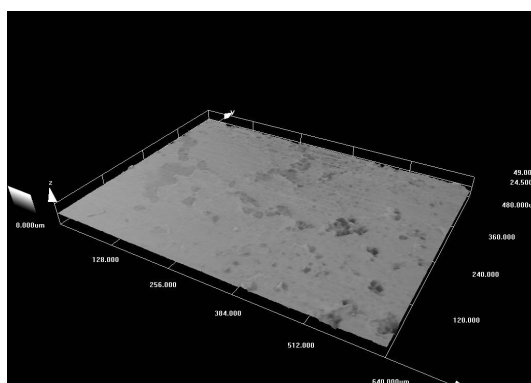
Obr. 4.4.15: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_68MPa



Obr. 4.4.16: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_83MPa

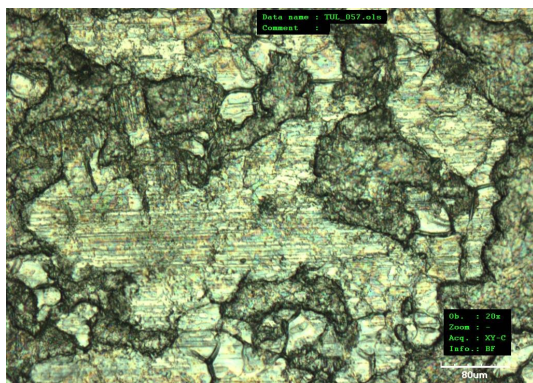


Obr. 4.4.17: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_83MPa

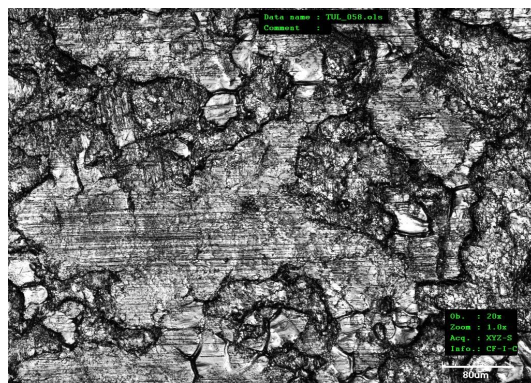


Obr. 4.4.18: HDG +  $\mu$ Ph TKS\_83MPa

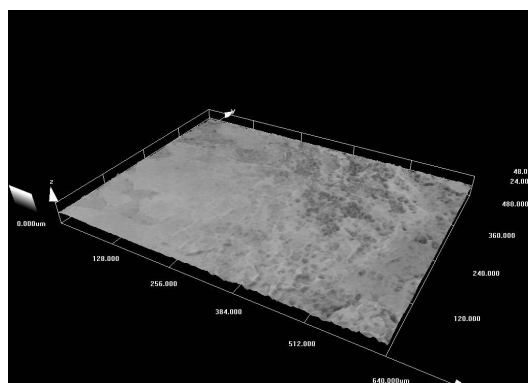




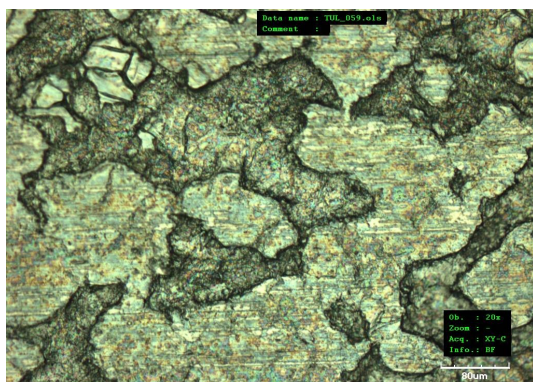
Obr. 4.4.19: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_8MPa



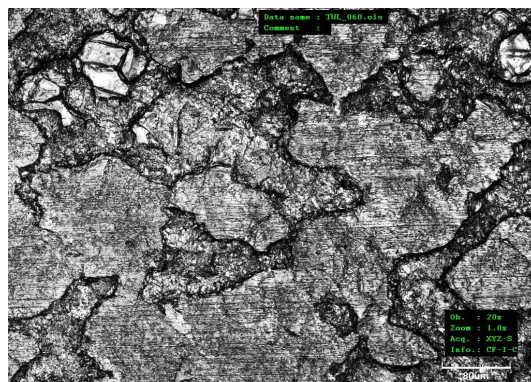
Obr. 4.4.20: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_8MPa



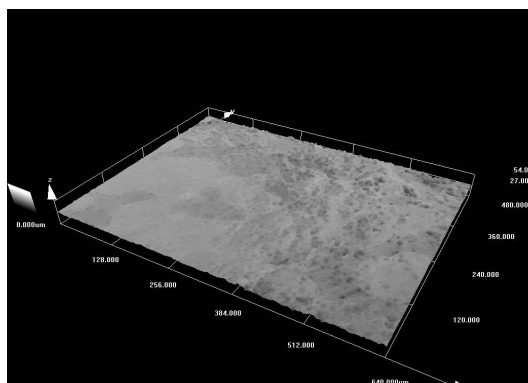
Obr. 4.4.21: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_8MPa



Obr. 4.4.22: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_23MPa

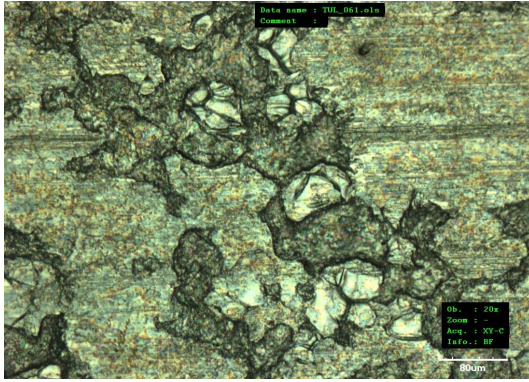


Obr. 4.4.23: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_23MPa

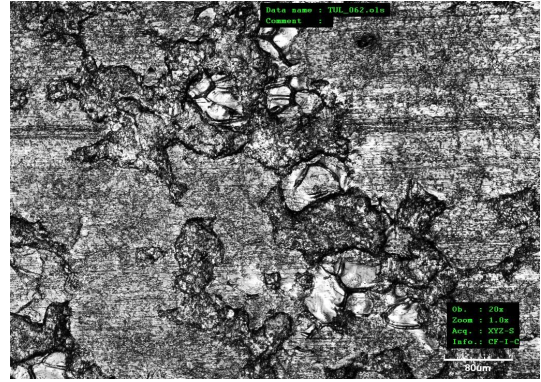


Obr. 4.4.24: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_23MPa

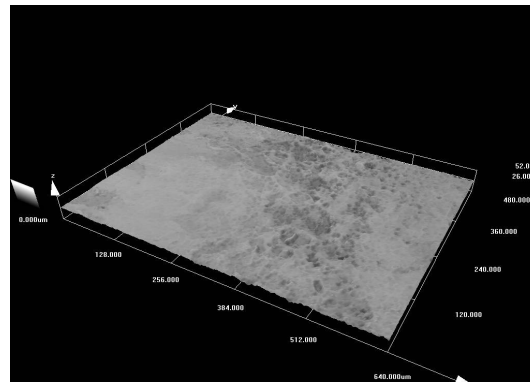




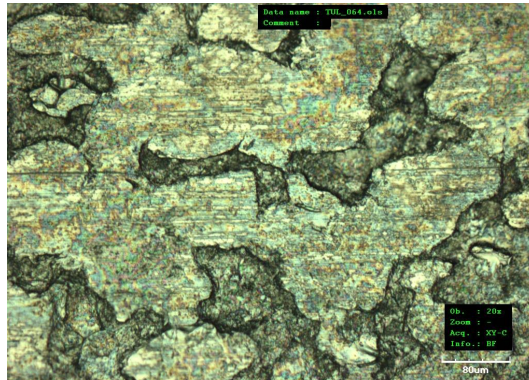
Obr. 4.4.25: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_38MPa



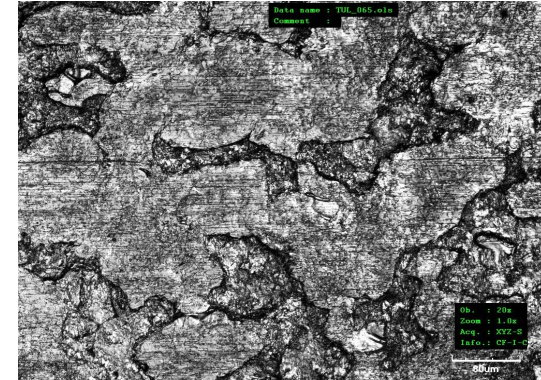
Obr. 4.4.26: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_38MPa



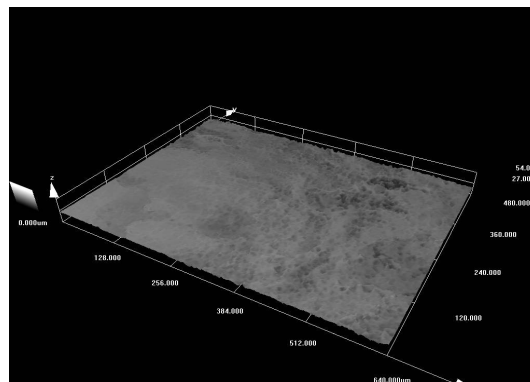
Obr. 4.4.27: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_38MPa



Obr. 4.4.28: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_53MPa

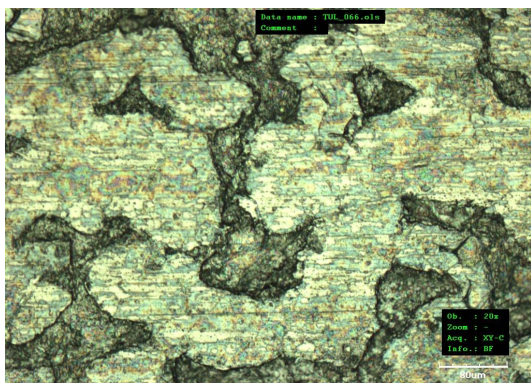


Obr. 4.4.29: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_53MPa

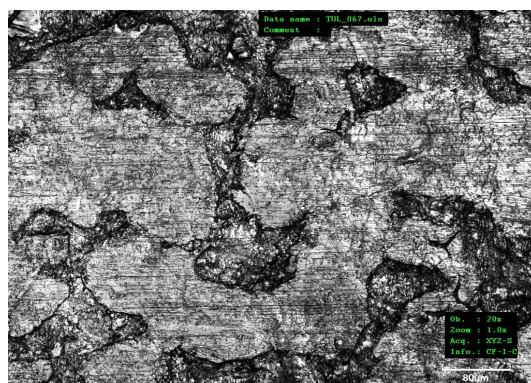


Obr. 4.4.30: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_53MPa

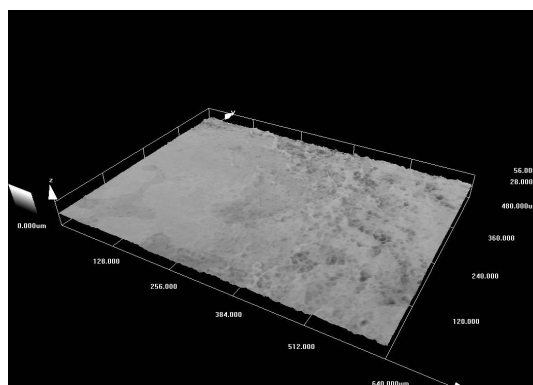




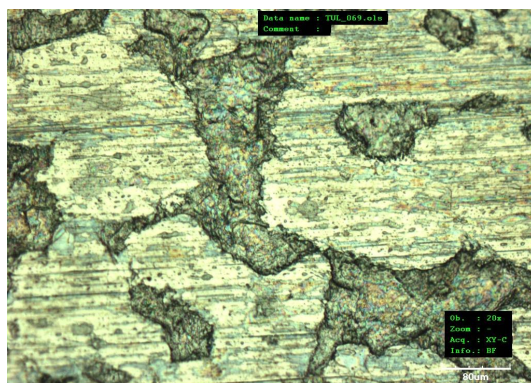
Obr. 4.4.31: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_68MPa



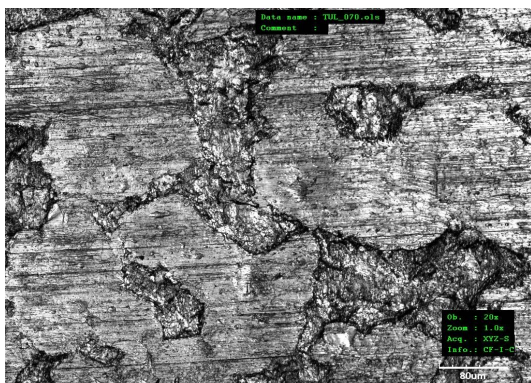
Obr. 4.4.32: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_68MPa



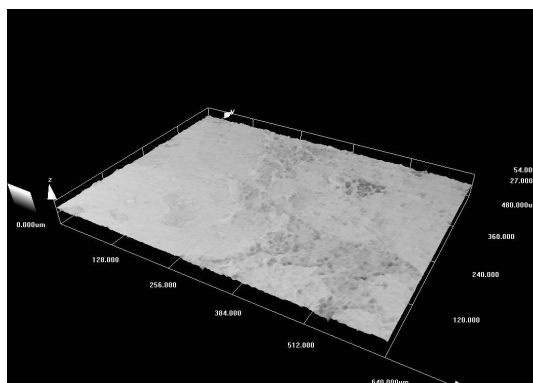
Obr. 4.4.33: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_68MPa



Obr. 4.4.34: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_83MPa

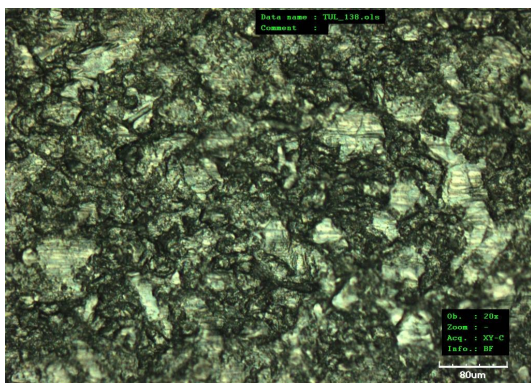


Obr. 4.4.35: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_83MPa

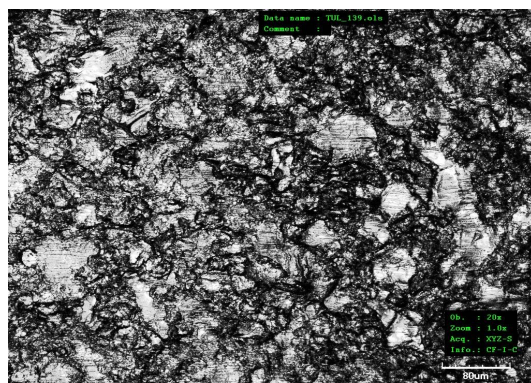


Obr. 4.4.36: HDG +  $\mu$ Ph Voest\_83MPa

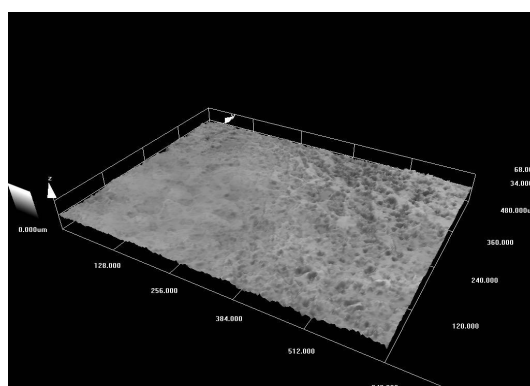




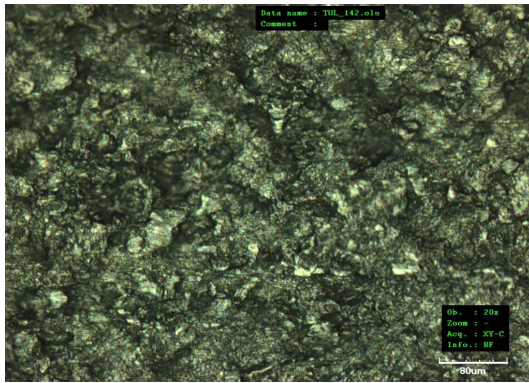
Obr. 4.4.37: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_8MPa



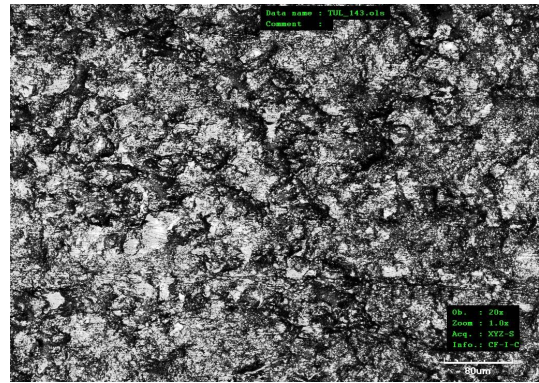
Obr. 4.4.38: HDG +  $\mu$ Ph US Steel\_8MPa



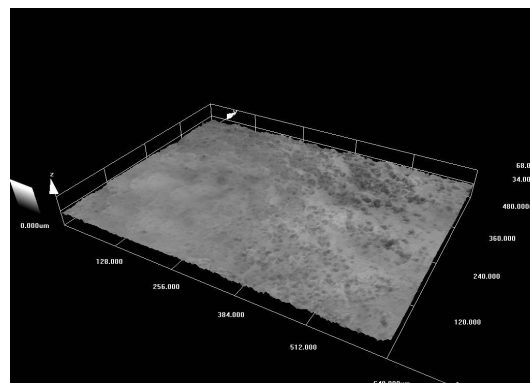




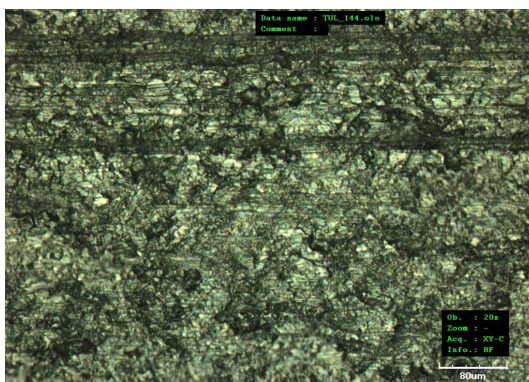
Obr. 4.4.43: HDG + μPh US Steel\_38MPa



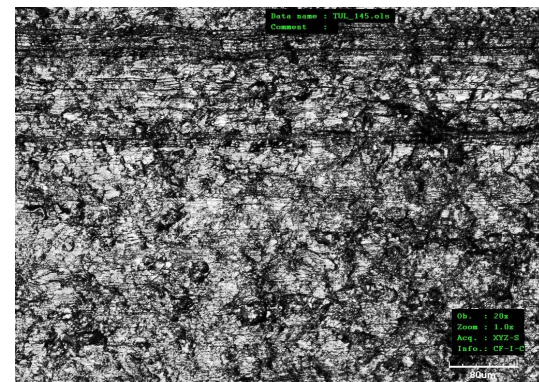
Obr. 4.4.44: HDG + μPh US Steel\_38MPa



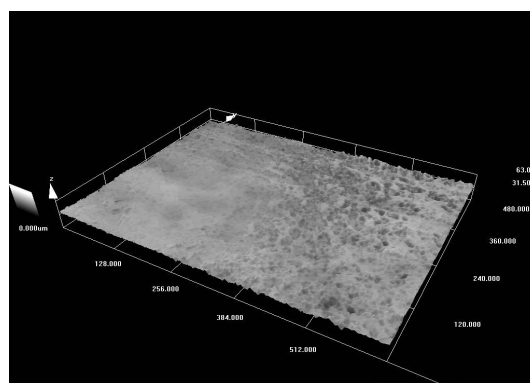
Obr. 4.4.45: HDG + μPh US Steel\_38MPa



Obr. 4.4.46: HDG + μPh US Steel\_53MPa

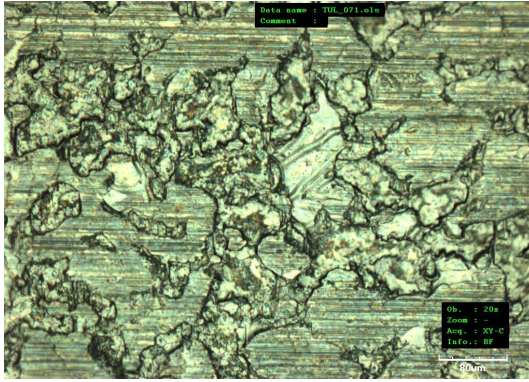


Obr. 4.4.47: HDG + μPh US Steel\_53MPa

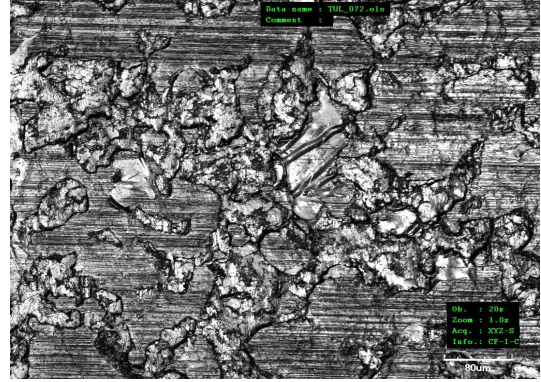


Obr. 4.4.48: HDG + μPh US Steel\_53MPa

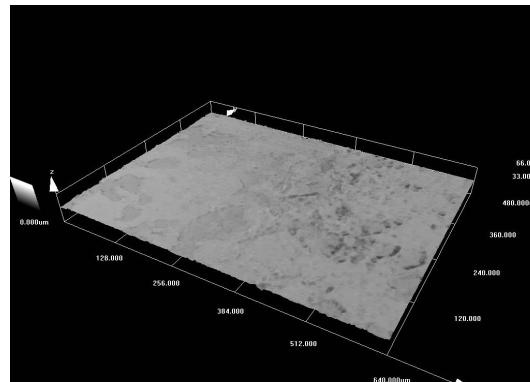




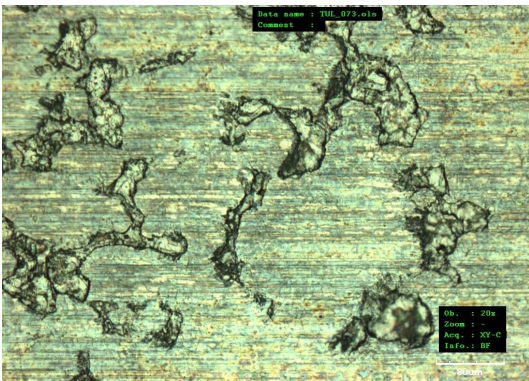
Obr. 4.4.49: HDG + NIT\_8MPa



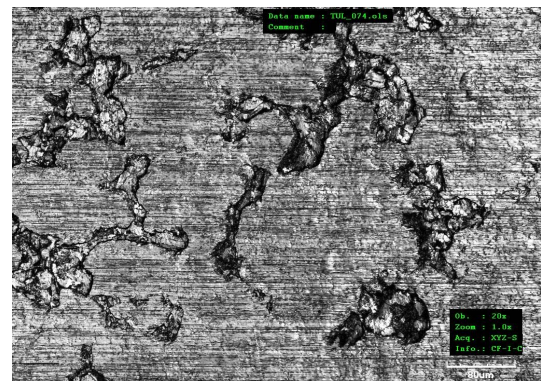
Obr. 4.4.50: HDG + NIT\_8MPa



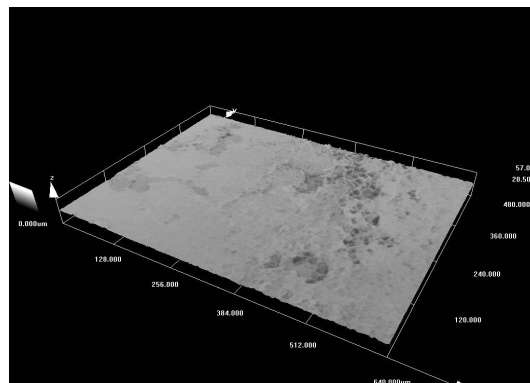
Obr. 4.4.51: HDG + NIT\_8MPa



Obr. 4.4.52: HDG + NIT\_23MPa

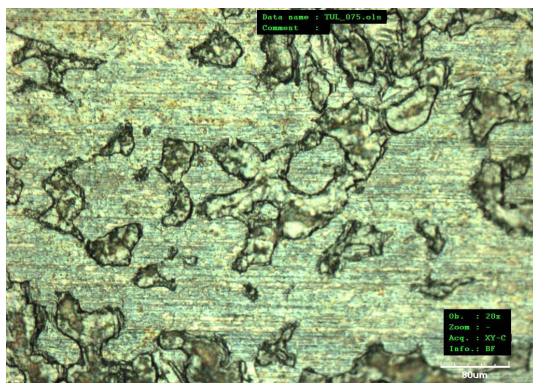


Obr. 4.4.53: HDG + NIT\_23MPa

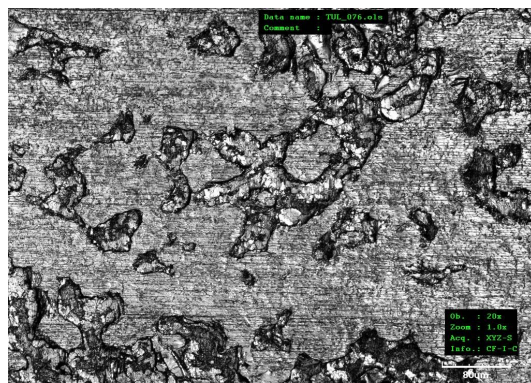


Obr. 4.4.54: HDG + NIT\_23MPa

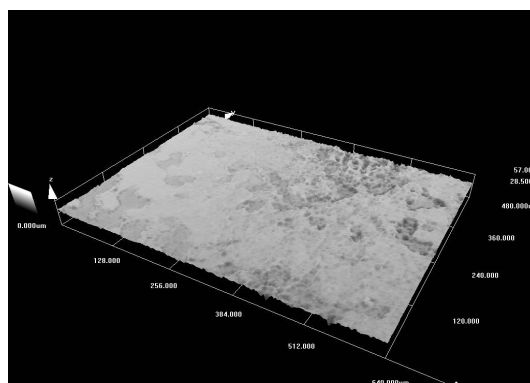




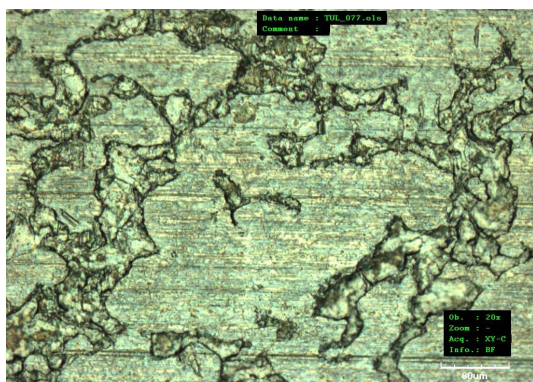
Obr. 4.4.55: HDG + NIT\_38MPa



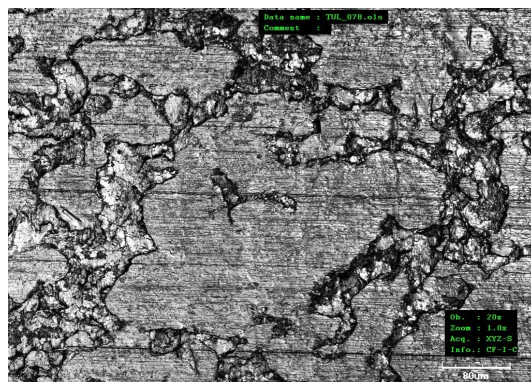
Obr. 4.4.56: HDG + NIT\_38MPa



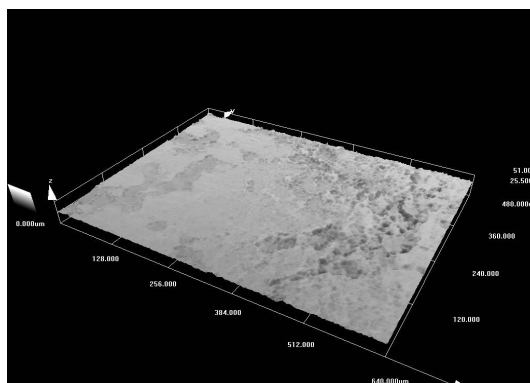
Obr. 4.4.57: HDG + NIT\_38MPa



Obr. 4.4.58: HDG + NIT\_53MPa

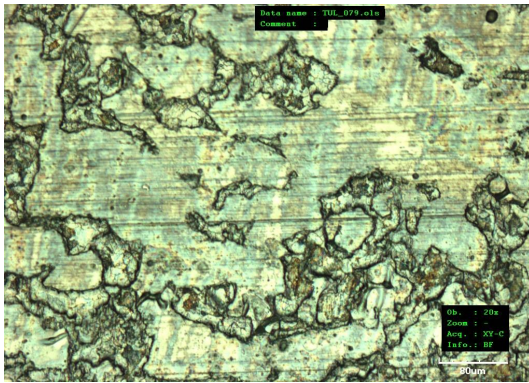


Obr. 4.4.59: HDG + NIT\_53MPa

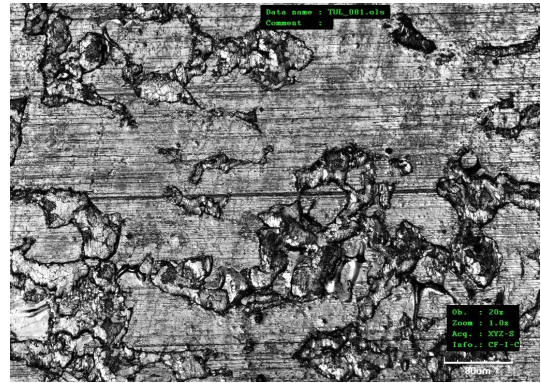


Obr. 4.4.60: HDG + NIT\_53MPa

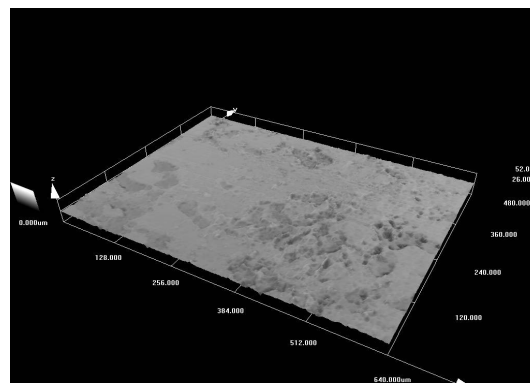




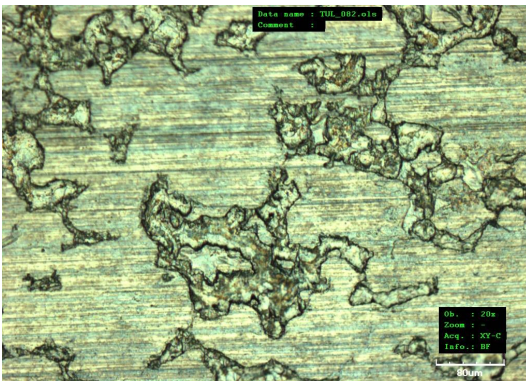
Obr. 4.4.61: HDG + NIT\_68MPa



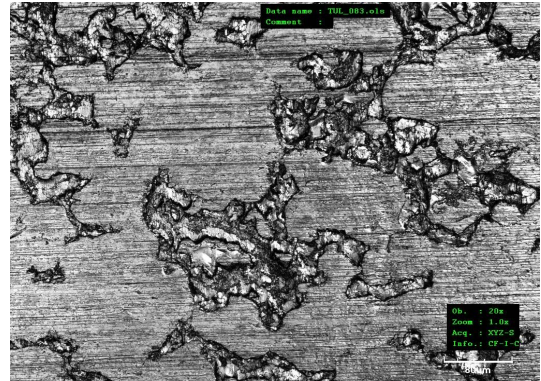
Obr. 4.4.62: HDG + NIT\_68MPa



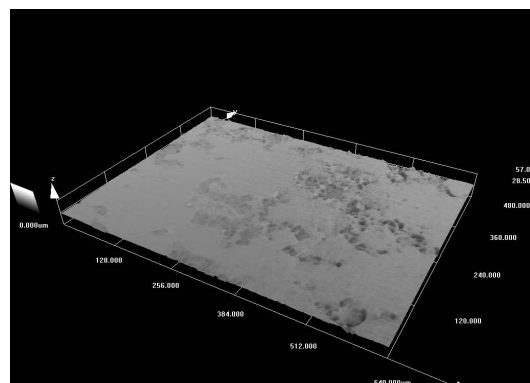
Obr. 4.4.63: HDG + NIT\_68MPa



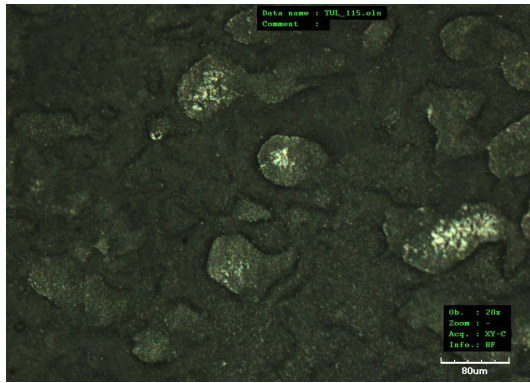
Obr. 4.4.64: HDG + NIT\_83MPa



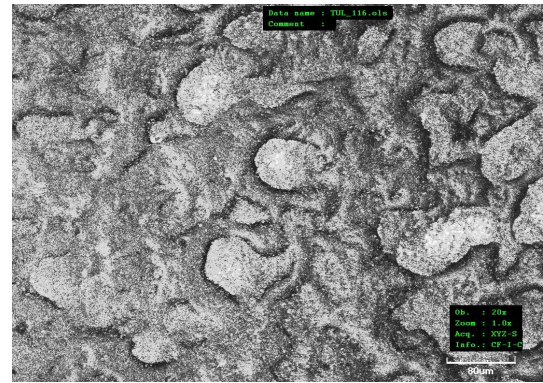
Obr. 4.4.65: HDG + NIT\_83MPa



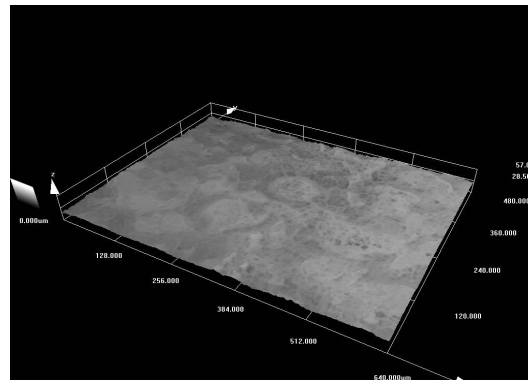
Obr. 4.4.66: HDG + NIT\_83MPa



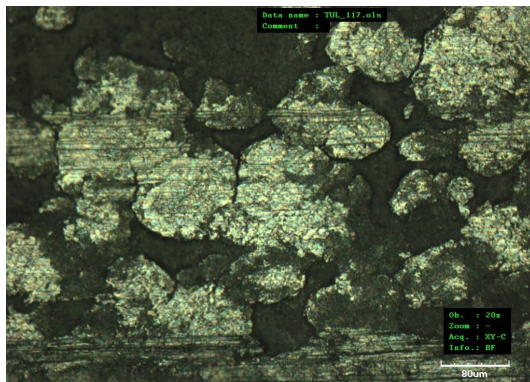
Obr. 4.4.67: EG + Ph\_8MPa



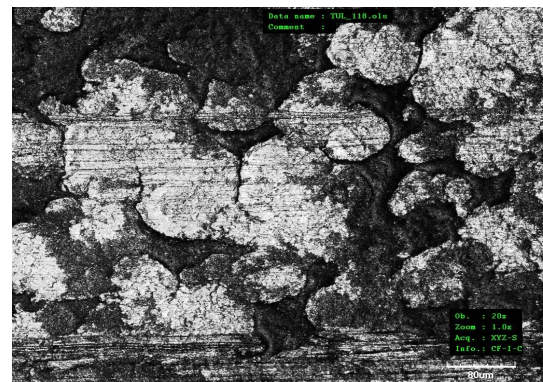
Obr. 4.4.68: EG + Ph\_8MPa



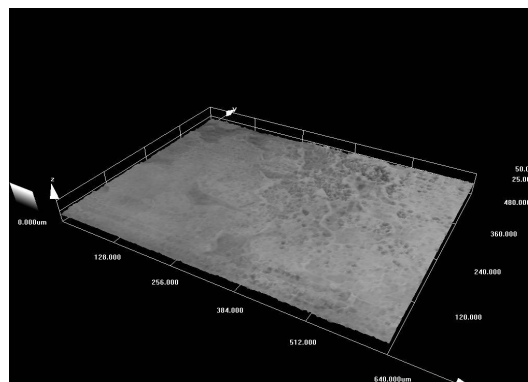
Obr. 4.4.69: EG + Ph\_8MPa



Obr. 4.4.70: EG + Ph\_23MPa

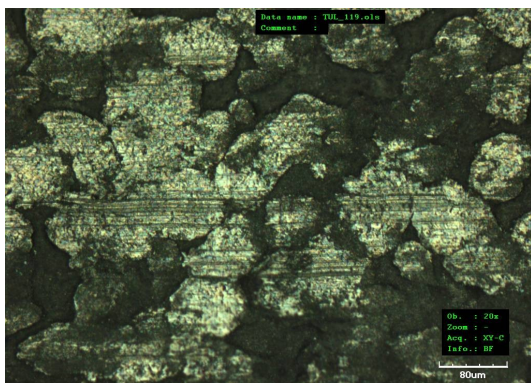


Obr. 4.4.71: EG + Ph\_23MPa

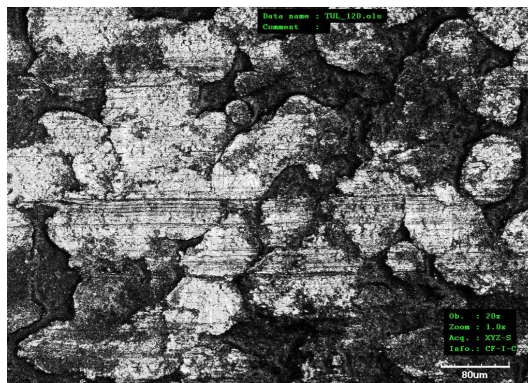


Obr. 4.4.72: EG + Ph\_23MPa

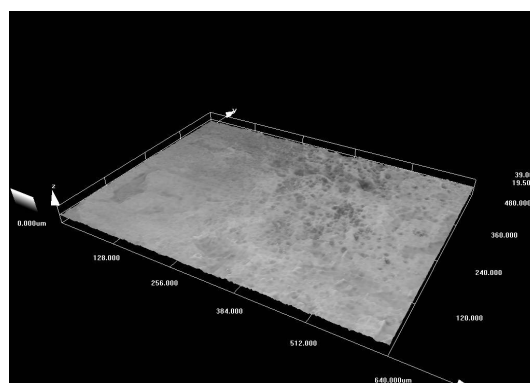




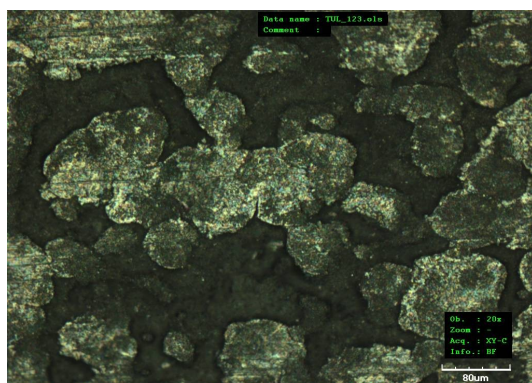
Obr. 4.4.73: EG + Ph\_38MPa



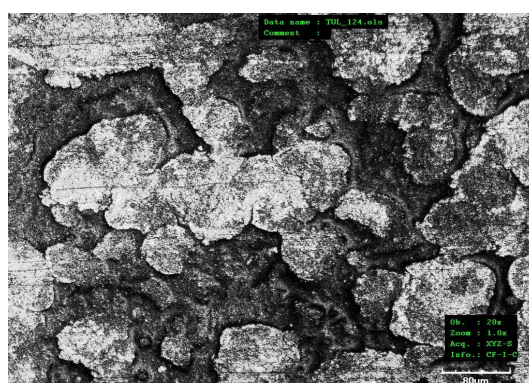
Obr. 4.4.74: EG + Ph\_38MPa



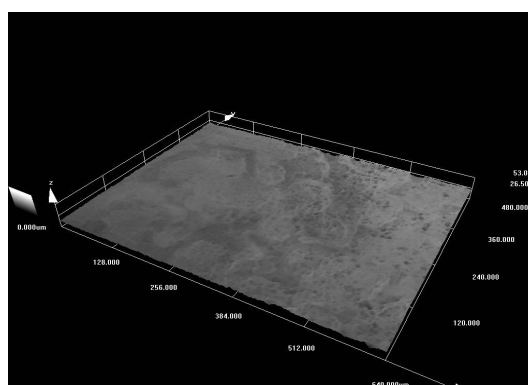
Obr. 4.4.75: EG + Ph\_38MPa



Obr. 4.4.76: EG + Ph\_53MPa

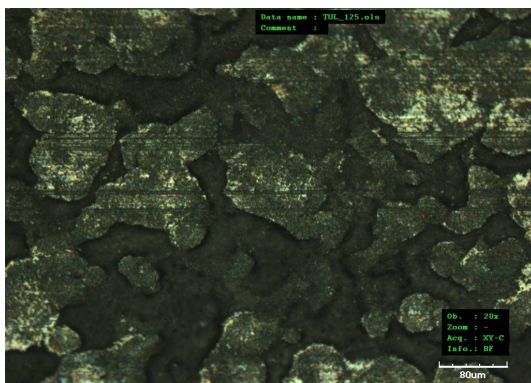


Obr. 4.4.77: EG + Ph\_53MPa

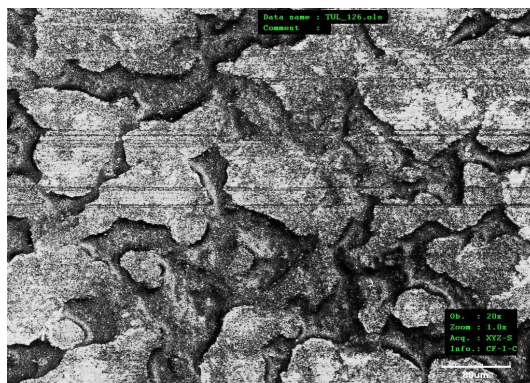


Obr. 4.4.78: EG + Ph\_53MPa

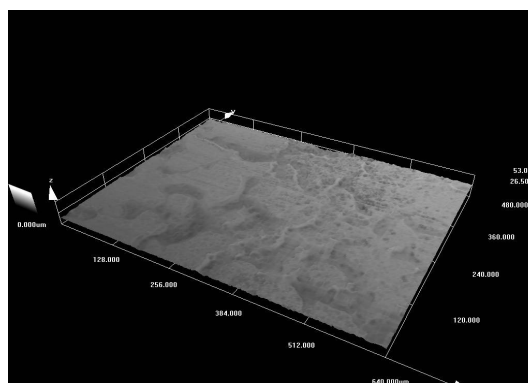




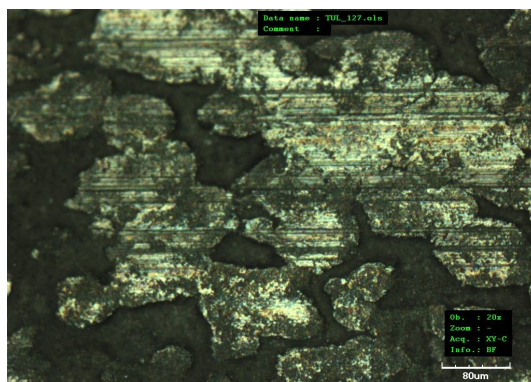
Obr. 4.4.79: EG + Ph\_68MPa



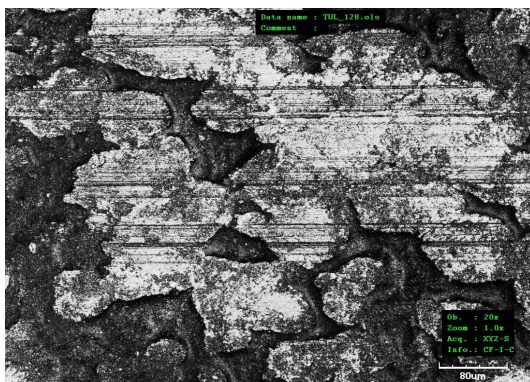
Obr. 4.4.80: EG + Ph\_68MPa



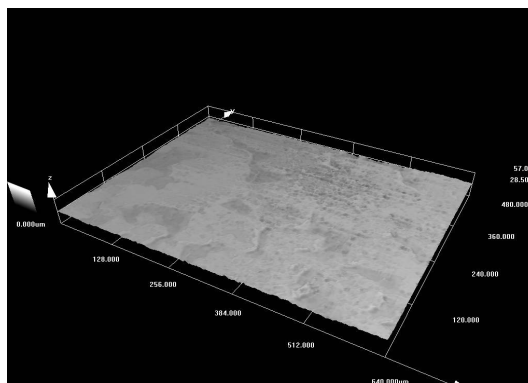
Obr. 4.4.81: EG + Ph\_68MPa



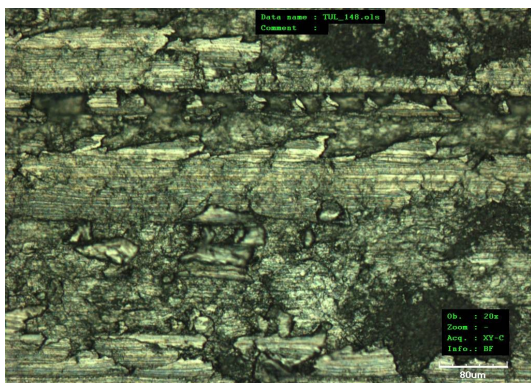
Obr. 4.4.82: EG + Ph\_82MPa



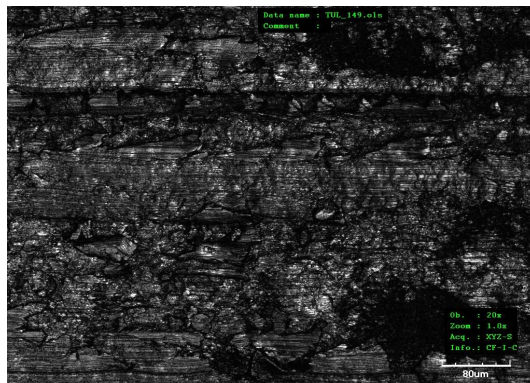
Obr. 4.4.83: EG + Ph\_83MPa



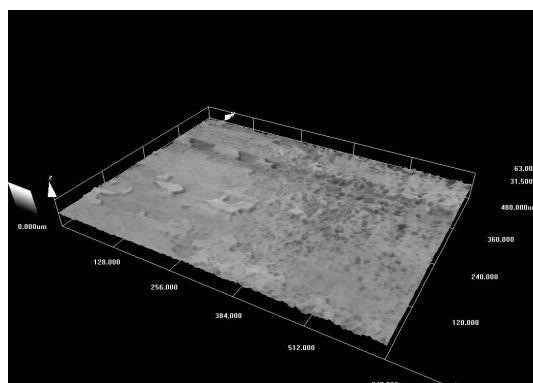
Obr. 4.4.84: EG + Ph\_83MPa



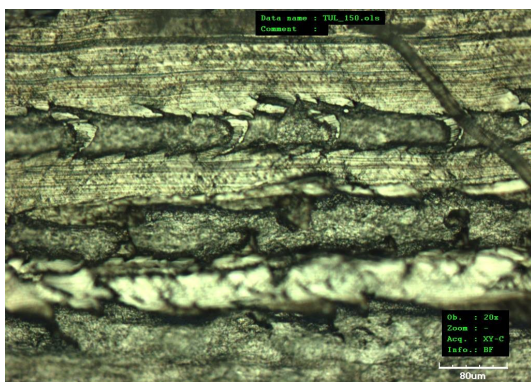
Obr. 4.4.85: EG + NST Arcelor\_8MPa



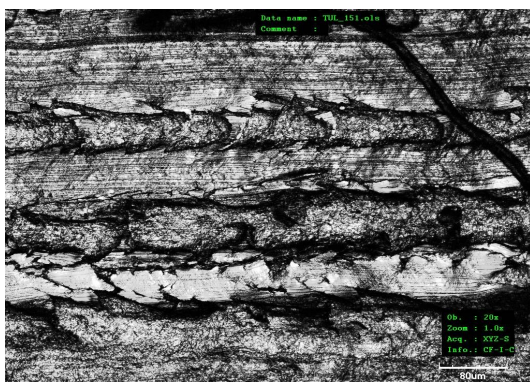
Obr. 4.4.86: EG + NST Arcelor\_8MPa



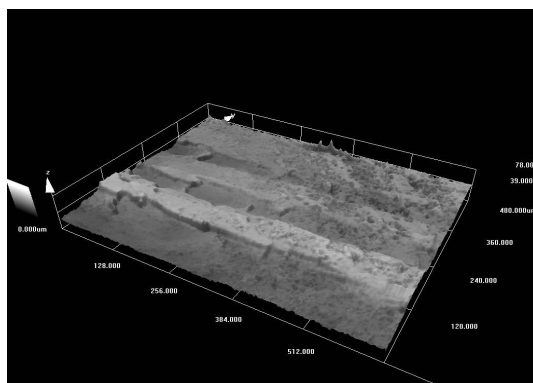
Obr. 4.4.87: EG + NST Arcelor\_8MPa



Obr. 4.4.88: EG + NST Arcelor\_23MPa

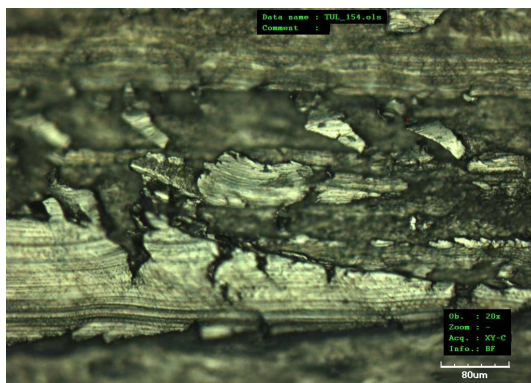


Obr. 4.4.89: EG + NST Arcelor\_23MPa

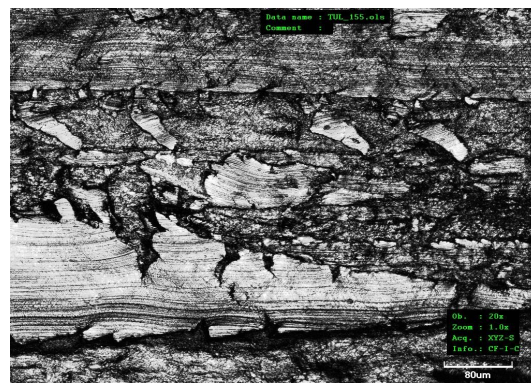


Obr. 4.4.90: EG + NST Arcelor\_23MPa

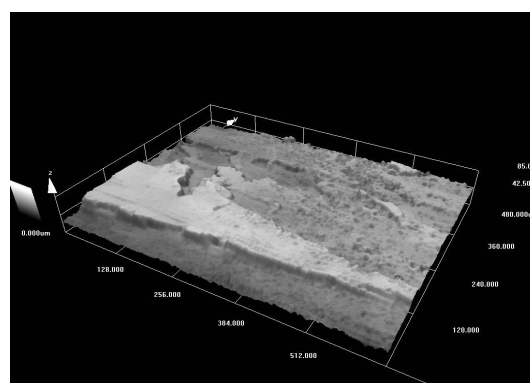




Obr. 4.4.91: EG + NST Arcelor\_38MPa



Obr. 4.4.92: EG + NST Arcelor\_38MPa



Obr. 4.4.93: EG + NST Arcelor\_38MPa

## 5. Rozbor získaných výsledků

Pro porovnání vlastností jednotlivých materiálů byly vypočítány procentuální rozdíly dosažených výsledků z průběhů koeficientu tření. Rozdíly byly počítány pro jednotlivé tlaky a porovnány vůči etalonovému vzorku. Etalonovým vzorkem je materiál EG+Ph, který představuje ve všech případech 100%. Výsledky procentuálních rozdílů u jednotlivých tlaků jsou vidět v tabulkách 5.1, 5.2 pro kalené čelisti a 5.3, 5.4 pro nekalené čelisti. Kladné odchylky představují horší koeficient tření než má etalon a záporné odchylky naopak lepší průběh koeficientu tření než má EG+Ph etalon.

Tab. 5.1: Výsledky procentuálních rozdílů (hodnoty v %)

Fs – kalení čelisti						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
EG + Ph	100	100	100	100	100	100
HDG + $\mu$ Ph TKS	-13,7	-2,0	-6,2	-21,3	-12,0	-16,5
HDG + $\mu$ Ph Voest	-4,8	6,1	0,7	-17,3	-6,5	-8,8
HDG + $\mu$ Ph US Steel	-4,8	6,1	-4,8	-24,7	-26,9	-22,0
HDG + NIT	-17,8	-21,6	-31,0	-39,3	-22,2	-14,3
EG + NST Arcelor	77,4	96,6				

Tab. 5.2: Výsledky procentuálních rozdílů (hodnoty v %)

Fh – kalené čelisti						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
EG + Ph	100	100	100	100	100	100
HDG + $\mu$ Ph TKS	-13,8	13,4	21,0	-18,3	11,0	7,5
HDG + $\mu$ Ph Voest	-6,3	23,2	33,1	-12,7	19,7	19,8
HDG + $\mu$ Ph US Steel	-6,9	20,7	29,3	-19,2	0,0	-4,7
HDG + NIT	-16,1	-20,1	-31,2	-54,0	-30,7	-22,6
EG + NST Arcelor	78,7	93,3	104,5			

Tab. 5.3: Výsledky procentuálních rozdílů (hodnoty v %)

Fs – nekalené čelisti						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
EG + Ph	100	100	100	100	100	100
HDG + $\mu$ Ph TKS	-39,6	-25,0	-21,7	-15,5	-15,9	-14,6
HDG + $\mu$ Ph Voest	-27,0	-9,3	-4,3	-2,3	-6,5	-1,2
HDG + $\mu$ Ph US Steel	-15,1	-7,0	-19,3	17,8		
HDG + NIT	-28,3	-17,4	-18,0	-18,6	-20,6	-13,4
EG + NST Arcelor	39,0	99,4				

Tab. 5.3: Výsledky procentuálních rozdílů (hodnoty v %)

Fh – nekalené čelisti						
Tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
EG + Ph	100	100	100	100	100	100
HDG + $\mu$ Ph TKS	-35,9	-11,5	1,7	3,2	9,4	18,8
HDG + $\mu$ Ph Voest	-23,6	15,1	30,3	24,7	24,4	36,5
HDG + $\mu$ Ph US Steel	-11,3	-4,2	-7,4	39,2	45,7	
HDG + NIT	-25,6	-2,6	7,4	-2,5	-1,6	8,3
EG + NST Arcelor	33,3	94,3	81,7			

Dále jsem vypracoval jako hodnocení jednotlivých materiálů průměrnou hodnotu odchylky průběhu koeficientu tření vzhledem k etalonu EG+Ph. Uvedené hodnoty, opět pro kalené a nekalené čelisti, jsou uvedeny níže. Hodnota plusové odchylky představuje horší koeficient tření a hodnota minusové odchylky naopak lepší koeficient tření.

Etalon EG+Ph, Kalené čelisti, Fs- střední velikost síly:

- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph TKS se liší o -12,0%
- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph Voest se liší o -5,1%
- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph US Steel se liší o -12,8%
- Průměrná hodnota HDG + NIT se liší o -24,4%
- Průměrná hodnota EG + NST Arcelor se liší o +87,0%

Etalon EG+Ph, Kalené čelisti, Fh- maximální velikost síly:

- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph TKS se liší o +3,5%
- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph Voest se liší o +12,8%
- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph US Steel se liší o +3,5%
- Průměrná hodnota HDG + NIT se liší o -29,1%
- Průměrná hodnota EG + NST se liší o +92,2%

Etalon EG+Ph, Nekalené čelisti, Fs- střední velikost síly:

- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph TKS se liší o -22,1%
- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph Voest se liší o -8,5%
- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph US Steel se liší o -5,9%
- Průměrná hodnota HDG + NIT se liší o -19,4%
- Průměrná hodnota EG + NST se liší o +69,2%

Etalon EG+Ph, Nekalené čelisti, Fh- maximální velikost síly:

- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph TKS se liší o -2,4%
- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph Voest se liší o +17,9%
- Průměrná hodnota HDG +  $\mu$ Ph US Steel se liší o +12,4%
- Průměrná hodnota HDG + NIT se liší o -2,8%
- Průměrná hodnota EG + NST se liší o +69,8%

## **5.2. Hodnocení z hlediska použitých čelistí**

Z výsledků průběhů koeficientů tření je patrné, že nelze s jistotou říct, který pár čelistí je horší či lepší. Předpoklad byl, že kalená čelist nám zajistí nižší průběh koeficientu tření, než čelist nekalená. To se ovšem nepotvrdilo. Z výsledků vyplývá, že pro některé materiály je vhodné volit kalenou a pro jiné nakalenou čelist. V dalším hodnocení (v kap. 5.2.1. a 5.2.2.) si povšimněme rozdílného seřazení, dle vhodnosti materiálů, za použití kalených nebo nekalených čelistí.

### **5.2.1. Hodnocení z hlediska použití kalených čelistí**

Zhodnocení provedu společně s etalonem EG+Ph v jednotlivém pořadí, jak bych materiály doporučil. Číslem 1 bude začínat nejvhodnější materiál směrek k nejméně vhodnému na pořadovém čísle 6. Pořadí jsem složil z průměrné hodnoty odchylky koeficientu tření.

- a) V případě použití kalených čelistí se jako nejlepší materiál z hlediska velikosti střední síly  $F_s$  jeví:
  - 1. HDG + NIT
  - 2. HDG +  $\mu$ Ph US Steel
  - 3. HDG +  $\mu$ Ph TKS
  - 4. HDG +  $\mu$ Ph Voest
  - 5. EG+Ph
  - 6. EG + NST Arcelor
  
- b) V případě použití kalených čelistí se jako nejlepší materiál z hlediska velikosti maximální síly  $F_h$  jeví:
  - 1. HDG + NIT
  - 2. EG + Ph
  - 3. HDG +  $\mu$ Ph US Steel
  - 4. HDG +  $\mu$ Ph TKS
  - 5. HDG +  $\mu$ Ph Voest
  - 6. EG + NST Arcelor

### **5.2.2. Hodnocení z hlediska použití nekalených čelistí**

Zhodnocení provedu opět společně s etalonem EG+Ph v jednotlivém pořadí, jak bych materiály doporučil. Číslem 1 bude začínat nejvhodnější materiál směrek k nejméně vhodnému na pořadovém čísle 6. Pořadí jsem složil z průměrné hodnoty odchylky

koeficientu tření.

c) V případě použití nekalených čelistí se jako nejlepší materiál z hlediska velikosti střední síly  $F_s$  jeví:

1. HDG +  $\mu\text{Ph}$  TKS
2. HDG + NIT
3. HDG +  $\mu\text{Ph}$  Voest
4. HDG +  $\mu\text{Ph}$  US Steel
5. EG+Ph
6. EG + NST Arcelor

d) V případě použití nekalených čelistí se jako nejlepší materiál z hlediska velikosti maximální síly  $F_h$  jeví:

1. HDG + NIT
2. HDG +  $\mu\text{Ph}$  TKS
3. EG+Ph
4. HDG +  $\mu\text{Ph}$  US Steel
5. HDG +  $\mu\text{Ph}$  Voest
6. EG + NST Arcelor

### **5.3. Hodnocení dle jednotlivých tlaků a drsností**

Nakonec hodnocení jednotlivých tlaků a drsností. Budu hodnotit materiály k jednotlivým tlakům podle maximální velikosti síly  $F_h$  vycházející z tribologického testu. Při hodnocení budu vycházet z grafů 4.1.1.8 závislostí  $F_h$  pro kalené čelisti a 4.2.1.8 pro nekalené čelisti. Nebudu již záměrně popisovat materiál EG + NST Arcelor, který už od nízkých tlaků vykazuje vysoký koeficient tření a snahu o zadírávání. Navíc nebudu u kalených čelistí zmiňovat materiál HDG+NIT, který má zdaleka nejlepší charakteristiky napříč všemi tlaky.

#### **5.3.1. Hodnocení dle jednotlivých tlaků**

Při použití kalených čelistí se do tlaku 40MPa nejlépe osvědčil substrát EG+Ph. Mezi mikrofosfáty se do tlaku 40MPa drží na nejnižších hodnotách koeficientu tření HDG +  $\mu\text{Ph}$  TKS, následuje HDG +  $\mu\text{Ph}$  US Steel a HDG +  $\mu\text{Ph}$  Voest. Mezi 40MPa až 45MPa se začínají charakteristiky materiálů měnit. Po překročení hranice 45MPa se materiál EG+Ph vlivem zadírávání dostává na nejhorší pozici a to až do tlaku 60MPa, kde koeficient tření začne se vzrůstajícím tlakem klesat. Mezi mikrofosfáty se v oblastech tlaků nad 45MPa nejlépe

chová HDG +  $\mu$ Ph US Steel, následuje HDG +  $\mu$ Ph TKS a HDG +  $\mu$ Ph Voest.

Pokud jde o průběh hodnot u nekalených čelistí, do tlaku 23MPa je nevhodnějším substrátem HDG +  $\mu$ Ph TKS, poté HDG+NIT, HDG +  $\mu$ Ph US Steel a EG + Ph.

HDG +  $\mu$ Ph Voest se zpočátku vyznačuje nárůstem koeficientu tření až do tlaku 30MPa, potom začne klesat. Ale i přesto má z materiálů, které vydržely všechny tlaky nejhorší charakteristiku. Do tlaku 38MPa bych doporučil materiály v pořadí HDG +  $\mu$ Ph TKS, EG + Ph a HDG+NIT. Okolo tlaku 45MPa se těmito třem substráty začnou měnit vlastnosti a doporučil bych je v odlišném pořadí. Pro tlaky nad 45MPa bych jako první volil EG + Ph, poté HDG + NIT a nakonec HDG +  $\mu$ Ph TKS.

### 5.3.2. Hodnocení dle a drsností

Kvalitu povrchu můžeme hodnotit i z hlediska snímků a hodnot drsností. Pokud jde o drsnost, můžeme vyzorovat její klesající tendenci vzhledem k růstu tlaku. Tedy čím vyšší tlak, tím nižší hodnota drsnosti. V případě, kdy u materiálu dochází k zadírání dochází k nárůstu drsnosti a charakteristika průběhu drsností  $R_a$ ,  $R_{Pc}$  a  $R_z$  může kolísat. Hodnoty drsnosti byly měřeny třikrát a poté zprůměrovány. Pro relevantní výsledky by bylo nutné zvýšit počet měření.

Pro kalené čelisti dosáhl nejlepších hodnot drsností  $R_a$  materiál HDG +  $\mu$ Ph US Steel, nejhorší pak byl HDG + NST Arcelor. Pokud porovnáme povrchy zmíněných materiálů, lze skutečně vyzorovat veliký rozdíl. Povrch HDG + NST Arcelor je potrháný a se značným množstvím vrypů, zatímco HDG +  $\mu$ Ph US Steel má povrch téměř bez poškození. Pokud jde o zbylé mikrofosfáty HDG +  $\mu$ Ph TKS a HDG +  $\mu$ Ph Voest a HDG + NIT, jejich charakteristiky jsou téměř totožné.

Za použití nekalených čelistí se materiál HDG +  $\mu$ Ph US Steel zařadil naopak mezi nejhorší materiály pokud jde o průběh a drsnost. Z hlediska vzhledu a drsnosti bych při použití nekalených čelistí volil mikrofosfátované materiály v pořadí HDG +  $\mu$ Ph TKS a HDG +  $\mu$ Ph Voest a HDG + NIT.



## 6. Závěr

V rámci tribologického experimentu jsem se snažil dokázat použitelnost mikrofosfátovaných plechů v procesu tažení výlisků. Pro zkoušení jsem měl na výběr z šesti druhů následujících materiálů: HDG+ $\mu$ Ph TKS, HDG+ $\mu$ Ph Voest, HDG+ $\mu$ Ph US Steel, HDG+NIT, EG+NST Arcelor a EG+Ph. Přičemž materiál EG+Ph je v současnosti, oproti ostatním plechům, v automobilovém průmyslu hojně využíván. V tomto případě tedy fungoval jako etalon, neboli plech porovnávací vůči ostatním. Důvodem snahy o nahrazení, je jeho standardní vrstva fosfátu, která není vhodná pro technologie běžně následující po lisování, jako je svařování, lepení nebo lakování. Snaha je tedy omezit tloušťku fosfátu.

Z šesti testovaných materiálů jsou tři zároveň pozinkované (HDG+ $\mu$ Ph TKS, HDG+ $\mu$ Ph Voest, HDG+ $\mu$ Ph US Steel), dva jsou zinkované elektrolyticky (EG+NST Arcelor a EG+Ph-etalon) a nakonec jsem si nechal materiál HDG+NIT, který kromě pozinkované vrstvy obsahuje ještě vrstvu sulfidů.

Vhodnost jednotlivých substrátů lze rozpoznat z grafů závislosti koeficientu tření na velikosti působícího tlaku a na porovnání nafocených snímků mikroskopem. Na grafech závislosti jsou jasně vidět průběhy jednotlivých vzorků.

Pokud tedy budu porovnávat pouze podle grafů, tak při zkoušce kalenými čelistmi dosáhl nejlepšího výsledku materiál HDG+NIT. Jako další vyšel nejlépe EG+Ph, což je divné, protože to neodpovídá naměřeným a porovnávaným hodnotám. Totiž v tomto případě jsou výsledky poněkud zkreslené. Střední velikost síly  $F_s$  je u tohoto plechu větší, než u ostatních a to i přesto, že vykazuje daleko menší odpor proti zadření, neboli Stick-Slip efekt. Je tedy důležité, která kritéria budeme v budoucnu hodnotit z hlediska použitelnosti materiálu. Jestli to bude střední síla  $F_s$ , nebo maximální síla  $F_h$ .

Podíváme-li se na zároveň pozinkované plechy HDG+ $\mu$ Ph TKS, HDG+ $\mu$ Ph Voest, HDG+ $\mu$ Ph US Steel, jsou jejich charakteristiky téměř totožné. Pokud bych měl tedy vybrat ten nejlepší z těchto tří, zvolil bych materiál HDG+ $\mu$ Ph TKS, protože má dle nafocených snímků nejméně poškozenou vrchní vrstvu.

Při hodnocení materiálů z hlediska použití nekalených čelistí lze vyčíst z grafu průběhu střední síly velkou podobnost materiálů HDG+ $\mu$ Ph TKS, HDG+ $\mu$ Ph Voest, HDG+NIT a EG+Ph. Z hlediska vzhledu povrchu po tribologické zkoušce bych opět volil substrát HDG+NIT. Materiál HDG+ $\mu$ Ph US Steel bych použil za působení nižších tlaků do 40 MPa, protože při vyšších tlacích hrozí zadření.

Záměrně jsem v předchozích hodnotících odstavcích neuvedl materiál HDG+NST Arcelor. Ten z hlediska kalených i nekalených čelistí je v oblastech vyšších tlaků zcela nepoužitelný. Již od nízkých tlaků vykazoval značné známky odporu proti protažení pásky, tedy velmi vysokého koeficientu tření. Navíc se za hodnotou 23MPa zadřel a přetrhl.

Vzhledem k tomu, že zvolená zkouška nedokáže přesně testovat tribologické

podmínky, které vznikají ve skutečných nástrojích, je nutné brát v úvahu, že se materiál může chovat s jistými odchylkami.

### **Seznam použité literatury:**

- [1] BLAŠKOVIČ, P.; BALLA, J.; DZIMKO, M.: Tribológia, 1. vydání, Bratislava, 1990, 360 stran, ISBN 80-05-00 633-0
- [2] Štěpina, V.; Veselý V.: Maziva v tribologii, 1. vydání, Bratislava, 1985, 408 stran
- [3] SOLFRONK, P. : Vliv morfologie povrchu plechů na rozvoj deformace, Disertační práce, TU v Liberci, 2002
- [4] Kolnerová, M.: Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení, [Disertační práce], TU v Liberci, 2005.
- [5] [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/09.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm), Květen 2010
- [6] [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/tribologie.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/tribologie.pdf), Květen 2010
- [7] Návod k obsluze, Olympus C&S s.r.o., Praha. Konfokální rastrovací laserový mikroskop LEXT OLS 300. 2006. 528 s.
- [8] Kreibich, V.; Hoch, K.: Koroze a technologie povrchových úprav, 1991, ISBN 80-0100476-7, on-line skripta
- [9] [http://www.technicoat.cz/\\_data/files/File/fosfatovani.pdf](http://www.technicoat.cz/_data/files/File/fosfatovani.pdf), Květen 2010
- [10] Jerie, M.: Využití povlakovaných nástrojů pro hluboké tažení, Diplomová práce, TU v Liberci, 2005
- [11] <http://www.mahr.com/scripts/relocateFile.phpContentID=5306&NodeID=10778&FileID=7386&ContentDataID=14172&save=0>, Květen 2010

**Seznam příloh:**

Příloha č. 1-6 – Průběh tribologické zkoušky materiálů pro kalené čelisti

Příloha č. 7-12 – Průběh tribologické zkoušky materiálů pro nekalené čelisti

Příloha č. 13 – Atest maziva ANTICORIT PL 3802-39S